



Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

Aan

Rijkswaterstaat
RIKZ
t.a.v. Bibliotheek
Postbus 8039
4330 EA Middelburg

Contactpersoon
drs. R.M. Salden

Datum
8 juli 1997

Ons kenmerk
RIKZ/AB-97.60124

Project

SAP

Onderwerp

Aanbieding werkdocument 3D-slibmodel.

Doorkiesnummer
070-3114292

Bijlage(n)
1

Uw kenmerk

Hierbij stuur ik u een exemplaar van het RIKZ werkdocument, getiteld: "Een slib-transportmodel van het Schelde estuarium ten behoeve van waterkwaliteitsmodellering". Het werkdocument is tot stand gekomen binnen het project SAP. Het geeft de beschrijving van een driedimensionaal (3D) slibtransport model, waarmee de effecten van mogelijke ingrepen op de slibhuishouding gesimuleerd kunnen worden.

Het Schelde estuarium heeft te maken met verschillende ingrepen die de slibhuishouding van het systeem beïnvloeden. Enkele voorbeelden van ingrepen zijn: de slibonttrekking in de Beneden Zeeschelde, de ophanden zijnde verdieping van de vaargeul naar Antwerpen en de aanleg van gecontroleerde overstromingsgebieden.

Slib heeft in het estuarium een ecologische functie maar is als drager van contaminanten ook verantwoordelijk voor het transport van vervuiling. Om de consequenties van de genoemde ingrepen op de ecologie en de waterkwaliteit in te kunnen schatten is het nodig de effecten op de slibhuishouding in kaart te brengen. Dit gebeurt veelal door middel van een slibbalans.

Om de gevolgen van toekomstige ingrepen en inrichtingsscenario's te kunnen bepalen, is het 3D slibtransport model ontwikkeld. Het model berekent het transport van slib in het estuarium op basis van vooraf bepaalde hydrodynamische condities. Om de kwaliteit van het model te toetsen is met het model allereerst op fijne schaal de slibhuishouding in het estuarium bepaald, zoals die voor het begin van de jaren tachtig geldig is. De slibbalans voor deze periode - bepaald door Van Maldegem op basis van veldgegevens - dient als referentie voor het model.

In het werkdocument wordt de opzet van het model beschreven en worden tevens de modelresultaten gepresenteerd.



Het model is in staat gebleken de slibtransport processen in een groot deel van het Schelde estuarium goed weer te geven. Het transport van zowel fluviaal als marien slib over de Belgisch-Nederlandse grens wordt goed gerepresenteerd. Ook de variatie van de slibconcentratie over het getij komt goed overeen met de werkelijkheid. Minder goed wordt de menging van het slib over de waterkolom weergegeven, waardoor de concentratie-profielen sterk "uitgezakt" zijn. Het aantal processen dat expliciet gemodelleerd is, is beperkt. Deze processen zijn daarom slechts geparametriseerd weer te geven. De bedoeling is, deze beperking te zijner tijd op te heffen.

Ondanks de beperkingen kan het model goed als hulpmiddel gebruikt worden bij het inschatten van de gevolgen van systeeminterventies op de slibhuishouding in de Westerschelde. Zo kan de doorvertaling gemaakt worden van ingreep naar effecten op ecologie en waterkwaliteit.

Vragen naar aanleiding van het model kunt u stellen aan de auteur van het werkdocument: drs. R.M. Salden van de afdeling OSCT van het RIKZ in Den Haag, tel. 070-3114292.

Hoogachtend,

de Hoofdingenieur-directeur,
namens deze de projectleider SAP,

dr. G.T.M. van Eck

Errata: In het onderschrift bij de figuren 7, 8, 9.1 en 9.2 dient *Megaton* vervangen te worden door *miljoen kilo*.

Een slib-transportmodel van het Schelde estuarium ten behoeve van waterkwaliteitsmodellering.

Werkdocument RIKZ/OS-97.116X

Auteur R.M. Salden

April 1997



Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Rijks Instituut voor Kust en Zee / RIKZ

Inhoudsopgave.

1	Inleiding	1
2	Het Model	3
2.1	Beschrijving van het modelgebied en modelsetting	5
2.2	Koppeling van het hydrodynamisch model aan het slibmodel	5
2.2.1	Intermezzo frequentie gegevensopslag	6
2.2.2	Vervolg koppeling modellen	7
2.3	Beschikbare meetgegevens	7
2.4	Van slibmodel naar slibbalans	10
2.5	Parameterinstelling van het slibmodel	10
2.6	Aanpak slibberekeningen	12
2.6.1	Balans bepaling	12
2.6.2	Vergelijking met 13-uurs metingen	12
3	De modelresultaten	14
3.1	De slibbalans bepaald door het model	14
3.1.1	Modelresultaten	14
3.1.2	Correcties in de slibbalans voor gebieden met erosie	15
3.1.3	Concentratie gedurende het getij in de verschillende SAWES vakken	17
3.2	Het gedetailleerde slibmodel: getij verloop & profielen	19
3.2.1	Modelresultaten	19
3.2.2	13-uurs metingen	20
3.2.3	Concentratie profielen	21
3.3	Sedimentatie gebieden: vergelijking met lithografische kaarten	22
3.4	Het ruimtelijk patroon van slib in suspensie: vergelijking met Landsat beelden	23
4	Conclusies en aanbevelingen	25
4.1	Weergave en beperkingen van de modelprocessen	25
4.2	Evaluatie modelresultaten	26
	Literatuurlijst	27
	Lijst van Figuren	29

1. Inleiding

De afgelopen 25 jaar heeft het Schelde estuarium te maken gehad met een groot aantal menselijke ingrepen die effect hebben gehad op de slibhuishouding. Te noemen zijn de toenemende baggeractiviteit op de drempels voor het op diepte houden van de scheepvaartgeul, de verdieping van de vaargeul in de Westerschelde en de aanleg van havendokken en toegangsgeulen tot deze dokken in de Beneden Zeeschelde.

In deze laatste categorie vallen de aanleg van de Waaslandhaven met de Kallosluis (begin jaren tachtig) op de linkeroever van de Schelde en de Zandvlietsluis / Berendrechtsluis (1967/1988) op de rechteroever. In figuur 0 wordt een situatie schets van deel van de Schelde rond Antwerpen gegeven. De aanleg van de sluiscomplexen heeft serieuze gevolgen voor de slibhuishouding in het systeem gehad. De stroomsnelheden in de relatief diepe toegangsgeulen tot de havendokken zijn laag ten opzichte van de stroomsnelheid op de rivier, waardoor de geulen op zijn gaan treden als enorme slibvangen. Een groot deel van het slib dat oorspronkelijk in suspensie via de Beneden Zeeschelde de Westerschelde bereikte, sedimenteert nu in de toegangsgeulen. Bij het schutten verdwijnt een deel daarvan naar de havendokken zelf. Omdat de havens en geulen op diepte gehouden dienen te worden met het oog op de toegankelijkheid van de havendokken wordt er gebaggerd. De baggerspecie wordt teruggestort in de Beneden Zeeschelde, waardoor het slib uiteindelijk toch in de Westerschelde terecht komt. Vanaf eind jaren tachtig is er echter een omslag op in de omgang met de baggerspecie opgetreden. Sinds 1985 wordt in het kader van de "Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren" door Nederland een vergunning verlangd voor het terugstorten van baggerspecie op stortlocaties in de Westerschelde. In 1988 is de eerste WVO vergunning voor onderhoudsbaggerwerk afgegeven aan België. Steeds minder baggerspecie wordt teruggestort in het systeem en vanaf 1990 wordt al de baggerspecie op land opgespoten of geborgen in diepe gedeelten van de Waaslandhaven. Vanaf 1992 is deze verwijdering van slib uit de Beneden Zeeschelde als verplichting vastgelegd in de nieuwe WVO vergunning voor het onderhoudsbaggerwerk: "teneinde de water - en bodemkwaliteit in het Schelde Estuarium te verbeteren dient in de periode '92-'94 in het totaal 1.3 miljoen ton baggerslib uit de Beneden Zeeschelde verwijderd te worden".

Het effect van de slibverwijdering blijkt uit slibbalansen van de Beneden Zeeschelde, opgesteld door de Afdeling Maritieme Schelde, waarin de *slibaanvoer via de rivier de Schelde en baggercijfers opgenomen zijn* (zie [Taveniers, 1995 & 1996]). Ook in de slibbalans van [Vereeke, 1994] is de slibverwijdering verwerkt. Onzekerheid bestaat echter over de export van fluviatiel slib naar de Westerschelde, de import van marien slib uit de Westerschelde en de rol die de slibvoorraad in de Beneden Zeeschelde speelt in de slibbalans.

Naast ingrepen uit het verleden staan voor de komende jaren nog een aantal ingrepen op de rol. Een verdere verdieping van de vaargeul in de Westerschelde en de aanleg van gecontroleerde overstromingsgebieden zijn gepland. Plannen worden gemaakt voor een gewijzigde inrichting van de Westerschelde.

Om iets meer duidelijkheid te krijgen omtrent de vraag in welke mate het transport van fluviatiel - en marien slib beïnvloed worden door de slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde en wat de gevolgen zijn van toekomstige infrastructurele maatregelen, is een slib-transportmodel ontwikkeld. Het is een generiek model dat te gebruiken is in een willekeurig gebied. In dit werkdocument wordt de afregeling van het model beschreven voor het Schelde

estuarium. Beschreven wordt in hoeverre het model in staat is de "ongestoorte situatie" weer te geven. Hiermee wordt de toestand van voor 1990 aangeduid, toen er nog nauwelijks sprake was van slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde. De slibbalans die bij deze periode hoort is beschreven in [Van Maldegem, 1993a & 1993b].

Hoewel het model zo opgezet is dat het zowel de kleinschalige processen (tot de schaal van een kilometer) als de grootschalige processen (slibbalans van het gehele estuarium) weer zou moeten kunnen geven, kan het in de praktijk blijken dat representatie van de verschillende transportschalen verschillende parameterinstellingen vergt. Een reden hiervoor is dat we met weinig procesformuleringen in het model veel fysische verschijnselen willen weergeven. Bij afregeling van het model is als uitgangspunt gekozen dat de grootschalige transporten goed weergegeven dienen te worden. De slibbalans van de Westerschelde vormt immers de verbinding met het waterkwaliteitsmodel. Het is dit model dat een indruk zal moeten geven of de slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde het effect heeft gehad dat in de WVO-vergunning beoogd wordt.

2. Het Model

Wanneer we spreken van een slib-transportmodel hebben we het eigenlijk over twee modellen. In de eerste plaats hebben we voor de bepaling van het slibtransport een beschrijving van de waterbeweging nodig. Deze waterbeweging wordt berekend met behulp van het drie dimensionaal (3D) waterbewegingsmodel TRIWAQ. Het model rooster waarop de vergelijkingen worden opgelost is het SCALDIS400 rooster. De afregeling van dit hydrodynamisch model is beschreven in [Salden en Yang, 1996]. Ook de argumentatie voor het gebruik van een 3D model wordt in dit document gegeven. Uit het werkdocument blijkt dat het hydrodynamisch model de voor slibtransport van belang zijnde parameters als stroomsnelheid, verticale turbulente uitwisseling en verticale schering van het snelheidsveld uitstekend representeert. Voor details wordt naar dit werkdocument verwezen.

Het tweede model dat een rol speelt, is het model dat de eigenschappen van het slib verdisconteert. Voordat we verder gaan zal gedefinieerd moeten worden wat we onder slib verstaan. Voor het model zelf is dit niet essentieel - elke sediment fractie kan tenslotte getransporteerd worden - maar om vergelijking met data uit te kunnen voeren, moet afgesproken worden om welke data het gaat. Naar analogie van [Van Maldegem, 1993a] definiëren we slib als de anorganische minerale fractie van het sediment met een korrelgrootte kleiner dan $63 \mu\text{m}$.

De volgende slibeigenschappen spelen een rol bij de bepaling van het transport van het slib:

- de valsnelheid van de slibdeeltjes die er voor zorgt dat het slib uitzakt wanneer de turbulente menging voldoende klein is
- een kritische schuifspanning voor zowel erosie als sedimentatie waarmee bepaald wordt aan de hand van stroomsnelheid en bodemruwheid wanneer slib erodeert of sedimenteert
- flocculatie dat zorgt voor een toename van de valsnelheid als gevolg van grotere slibvlokken
- "hindered settling" dat zorgt voor een afname van de valsnelheid van de slibdeeltjes omdat er botsingen op gaan treden bij voldoende hoge concentraties
- het effect van golven, welke zorgen voor verweking van de bodem waardoor er slib beschikbaar komt voor transport

Deze processen bepalen in hoge mate wanneer het slib zich waar in de waterkolom bevindt. Als het slib eenmaal in suspensie is, zorgt de stroming die met het hydrodynamisch model berekend is voor het transport van de slibdeeltjes.

Het hydrodynamisch model zorgt voor Lagrangiaanse transport informatie: dit wil zeggen dat het transport van het water berekend wordt aan de hand van de stroming ter plaatse van het waterdeeltje, en niet zoals bij een Euleriaanse methode het geval is op een vaste positie (vaak een roosterpunt in het model). We volgen zo het werkelijke transportpad van het waterdeeltje. Vooral in gebieden waar de stroming een sterk niet-uniform (onregelmatig) karakter heeft, wijkt het transport bepaald op basis van Lagrangiaanse informatie af van het transport aan de hand van Euleriaanse snelheidsvelden. Voor meer informatie over hoe vanuit het hydrodynamisch model Lagrangiaanse transport informatie wordt verkregen wordt verwezen naar [Salden e.a., 1994].

Het model dat we gebruiken hebben voor het verdisconteren van de slibeigenschappen is SLIB3D. Voor het gebruik van het model wordt verwezen naar [Rozendaal, 1995], achtergrond informatie omtrent de numerieke methode die in het model geïmplementeerd is, is te vinden in [de Kok, 1994]. Van de lijst met processen die invloed hebben op het gedrag van het slib zijn er tot op heden echter maar enkele in het model opgenomen. De parameters die we tot onze beschikking hebben zijn de volgende:

- de valsnelheid van de slibdeeltjes
- de kritische snelheid voor erosie en sedimentatie
- een erosie coëfficiënt die de snelheid bepaalt waarmee erosie optreedt als de kritische erosie snelheid overschreden wordt.

Voor elke modellokatie kan slechts één waarde van genoemde parameters opgegeven worden zodat het niet mogelijk is tegelijkertijd verschillende slibfracties of soorten in beschouwing te nemen. De begraving van fijne slibdeeltjes door grovere zandkorrels kan om dezelfde reden ook niet gemodelleerd worden.

De valsnelheid is onafhankelijk van de slibconcentratie, zodat flocculatie en "hindered settling" niet gerepresenteerd worden. Dit heeft echter slechts gevolgen voor gebieden waar slibconcentraties van enkele honderden mg/l kunnen optreden (zoals in havens langs het estuarium). De invloed van golven op de slib beschikbaarheid is niet expliciet gemodelleerd. Het optreden van hoge golven gaat echter vaak gepaard met een hogere windsnelheid, hetgeen leidt tot hogere stroomsnelheden in de gehele waterkolom. Door de kritische erosie snelheid aan te passen kan een deel van het effect van golven in de berekening opgenomen worden.

De compenserende kracht voor de valsnelheid van de slibdeeltjes wordt gegeven door de turbulente verticale menging. Deze wordt in de vorm van een verticale diffusie coëfficiënt door het hydrodynamisch model aangeleverd. Deze coëfficiënt is ruimte - en tijdsafhankelijk en is afgeregeld op de saliniteitsverdeling over de waterkolom (zie [Salden en Yang, 1996]).

Voor sedimentatie S wordt de veel gebruikte formulering van Krone toegepast:

$$S = w_s \cdot C_b \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) \quad (1)$$

met $S = 0$ als $\tau_b > \tau_{cd}$
 w_s de valsnelheid
 C_b de slibconcentratie in de bodemlaag van het model
 τ_b de schuifspanning aan de bodem
 τ_{cd} de kritische schuifspanning voor sedimentatie

Voor erosie E hanteren we de formulering van Partheniades:

$$E = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1\right) \quad (2)$$

met $E = 0$ als $\tau_b < \tau_{ce}$
 M de erosie coëfficiënt ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
 τ_b de schuifspanning aan de bodem
 τ_{ce} de kritische schuifspanning voor erosie

De bodemschuifspanning τ_b wordt met behulp van de relatie:

$$\tau_b = \rho_w g \frac{v^2}{C^2} \quad (3)$$

uit de stroomsnelheid aan de bodem v en Chézy coëfficiënt C bepaald. Hierbij is ρ_w de dichtheid van water en g de zwaartekrachtsversnelling. Aan de randen van het model dienen randvoorwaarden opgegeven te worden. Bij instroom van water van buitenaf krijgt dit water de opgegeven slibconcentratie.

2.1 Beschrijving van het modelgebied en modelsetting.

Het horizontale grid strekt zich uit van Rupelmonde aan de rivierzijde van het model tot aan de lijn Westkapelle-Zeebrugge aan de zeezijde. Het modelgebied wordt weergegeven in figuur 1. In figuur 2 wordt voor delen van het modelgebied de ligging van de bodem gegeven. De resolutie is 400 bij 400 m in het grootste deel van het modelgebied en is hier rechthoekig. Ten oosten van Baalhoek vindt een overgang naar een kromlijinig rooster plaats. De gridresolutie neemt in dit deel van het modelrooster toe tot $\pm 30 \times 100$ m en de gridlijnen volgen zoveel mogelijk de hoofdgeul. Een nadeel van de schematisatie is dat de havens in de Beneden Zeeschelde er niet in opgenomen zijn. Het rooster loopt niet verder dan de sluizen die toegang geven tot de havencomplexen (Kallosluis, Zandvliet - en Berendrechtssluis). De sedimentatie die in de havens optreedt zal dus kunstmatig aangebracht dienen te worden. De bodem van het model stamt uit 1976. Morfologische veranderingen van na dit jaar zijn derhalve niet opgenomen in de modelbodem. Het gaat dan onder andere om de toegangsgeul naar de Kallosluis (Waaslandhaven). Ook de sedimentatie die in deze geul plaatsvindt dient door lokale sedimentatie aangebracht te worden. Voor de grootte van deze sedimentatie hebben we baggerdata tot onze beschikking.

Stroomopwaarts van Rupelmonde is het gebied geschematiseerd weergegeven. Door ook deze "staart" aan het modelgebied te plakken dekt het rooster het gehele gebied waar getij invloed aanwezig is. Dit maakt het mogelijk aan de rivierzijde van het model een eenvoudige debietrandvoorwaarde op te leggen. Het aantal roosterpunten in het horizontale modelrooster bedraagt 201×176 , waarvan ongeveer 20% actief aan de berekening deelneemt (de zogenaamde natte punten). Het grid is bekend onder de naam SCALDIS400.

In verticale richting worden er 6 lagen onderscheiden. De onderste laag van het model heeft een vaste dikte van 2.0 meter. De overige modellagen bestrijken een proportioneel deel van de resterende waterkolom. Hier wijkt de modelsetting van het slibmodel af van het hydrodynamisch model zoals beschreven in [Salden en Yang, 1996]. In het laatste geval is er sprake van 9 modellagen. Vanwege rekentijd en (intern) geheugengebruik van het programma zijn we hier genoodzaakt een concessie te doen aan de resolutie. Een testberekening met het slibmodel met 6 en 9 lagen geeft echter maar weinig verschil te zien in resultaat.

2.2 Koppeling van hydrodynamisch model aan het slibmodel.

Zoals al aangegeven, hebben we te maken met twee modellen waarmee na elkaar een berekening uitgevoerd wordt. Het hydrodynamisch model berekent de gegevens die nodig zijn voor de slibtransportberekening en schrijft deze weg op een file. De grootte van deze file hangt af van het aantal gegevens dat opgeslagen wordt, de periode waarover informatie opgeslagen wordt en

de frequentie waarmee dit gebeurt. Al snel is duidelijk geworden dat het ondoenlijk is een slibberekening te doen met "actuele hydrodynamica". Hiermee wordt bedoeld dat de berekening van de hydrodynamica dezelfde periode beslaat als de slibberekening. Om slib vanaf Rupelmonde in voldoende mate te transporteren tot aan Vlissingen, is een periode nodig die in de orde van drie maanden ligt. Om de bijbehorende hydrodynamische berekening uit te voeren heeft het werkstation een rekentijd van ongeveer een maand nodig. De uitvoer die gegenereerd wordt bedraagt ongeveer 4500 Mb aan gegevens. Dit leek ons niet de goede aanpak. Besloten is om het anders te doen. In plaats van een periode van drie maanden is één getijperiode berekend met het hydrodynamisch model. De getijperiode die ons voor ogen staat is van 12 april 1989. De eerste reden hiervoor is dat deze dag in de periode valt waarop het hydrodynamisch model is afgeregeld. Daarnaast was er op deze dag sprake van een gemiddeld getij. Het verloop van het getij in april bij Bath wordt gegeven in figuur 3.1. Hieruit blijkt dat het springtij was tussen 7 en 8 april en doodtij van 14 op 15 april. Ook is op deze dag de twee-dagelijkse ongelijkheid in het getij nauwelijks merkbaar.

Met een frequentie van 15 minuten is voor 12 april gedurende een getijperiode (12'25) de verplaatsing op basis van getij snelheden en de verticale diffusie coëfficiënt opgeslagen op een file. Dit betekent niet dat het transport over 15 minuten gemiddeld wordt berekend. De uitleg hiervan volgt in het volgende intermezzo.

2.2.1 Intermezzo frequentie gegevensopslag.

Met het hydrodynamisch model wordt Lagrangiaanse informatie berekend en na elk interval van 15 minuten opgeslagen. Aan het begin van elk interval wordt op elk roosterpunt in elke modell laag een "deeltje" losgelaten. Dit "deeltje" wordt gedurende 15 minuten gevolgd tijdens zijn verplaatsing. Deze verplaatsing wordt berekend door interpolatie van de snelheden - die met het model in de roosterpunten berekend worden - naar de positie van het deeltje. Het deeltje bevindt zich tenslotte niet exact in een model-roosterpunt. Omdat de snelheden door het model elke minuut opnieuw berekend worden, wordt de verplaatsing ook elke minuut bijgewerkt. Na 15 minuten wordt de eindpositie van het deeltje opgeslagen. Dit is in het algemeen weer geen positie die samenvalt met een roosterpunt. Zo wordt elke 15 minuten vanuit elk roosterpunt een "deeltje" losgelaten en wordt de eindpositie van dit "deeltje" vastgelegd. Met behulp van deze gegevens berekent SLIB3D het transport van slib. Duidelijk mag zijn dat niet over 15 minuten gemiddeld wordt, maar dat het transport met dezelfde tijdstap bepaald wordt als waarmee de hydrodynamica berekend wordt.

Het transport van slib wordt bepaald door een combinatie van advectie en diffusie. In de continue versie van de advectie-diffusie vergelijking wordt onder diffusie de moleculaire diffusie verstaan. In een model wordt deze vergelijking gediscretiseerd. Alle processen worden op een rooster opgelost. Hoe grover het rooster, desto meer processen niet gerepresenteerd kunnen worden. Om de verspreiding van slib als gevolg van deze processen te verdisconteren, wordt de diffusie coëfficiënt aangepast. Een nog belangrijkere oorzaak van verspreiding van slib is de variatie over de waterkolom van de stroomsnelheid. In een 3D-model wordt de verspreiding als gevolg van deze variatie expliciet berekend. In een 2D-model wordt deze verspreiding middels een hogere waarde van de diffusie coëfficiënt verwerkt.

Een hoopje slib dat op enig moment in de waterkolom aanwezig is, zal na verloop van tijd verplaatst en vervormd worden. De verplaatsing van het massamiddelpunt van het slibhoopje wordt door het hydrodynamisch model bepaald. Omdat het op Lagrangiaanse wijze gebeurt is de tijdstap niet van belang. De vervorming van het hoopje slib wordt in het SLIB3D programma berekend, deels uit aangeleverde informatie van het hydrodynamisch model (verticale diffusie coëfficiënt). De verspreiding van het hoopje slib in het

horizontale vlak wordt met de "second moment methode" berekend [de Kok, 1994], een alternatief voor het diffusie deel van de advection-diffusie vergelijking. Deze methode zorgt ervoor dat de structuur van een hoopje slib binnen een rooster cel deels behouden blijft. Het slib wordt niet - zoals in de advection-diffusie vergelijking het geval is - over de hele rooster cel uitgesmeerd, maar blijft gelokaliseerd binnen een (deel van een) rooster cel. De frequentie waarmee de verspreiding van het slibhoopje bepaald wordt, is wel essentieel voor het uiteindelijk transportresultaat. De tijdstap van 15 minuten leek een goed compromis tussen rekentijd en rekennauwkeurigheid.

N.B.: In de loop van de model berekeningen is gebleken dat het mechanisme voor verticale diffusie in het slibmodel een strengere beperking van de tijdstap-grootte oplegt dan in eerste instantie verwacht werd. De verticale diffusie zorgt voor de uitwisseling van slib tussen de verschillende modellagen. Gedurende een tijdstap (15 minuten) vindt echter alleen uitwisseling plaats met de direct aangrenzende lagen. Omdat we met 6 modellagen werken zal slib vanaf de bodem pas na 6 tijdstappen - anderhalf uur - het wateroppervlak bereiken. In werkelijkheid kan de waterkolom al in een half uur volledig opgemengd zijn. Op deze wijze zal naar mate het aantal modellagen toeneemt de snelheid waarmee slib vanaf de bodem het wateroppervlak bereikt afnemen. Dit verschijnsel is onwenselijk en niet juist. Het is echter niet meer mogelijk geweest het model op dit punt aan te passen.

Het gevolg is dat de slibconcentratie profielen over de waterkolom wat uitgezakt zullen zijn (er blijft te veel slib in de onderste lagen achter bij het aantrekken van de stroomsnelheid) en dat de slibconcentratie aan het wateroppervlak over het algemeen aan de lage kant zal zijn. Omdat het slib zich niet helemaal op de juiste positie in de waterkolom bevindt zal in theorie ook het transport beïnvloedt worden. Gemiddeld over het getij bevindt het slib zich echter ook in werkelijkheid onder in de waterkolom. De verwachting is dan ook dat de te kleine verticale menging voornamelijk resulteert in een onderschatting van verspreiding van een slibvlek (door scheringsdispersie) maar de richting van het transport weinig zal beïnvloeden.

2.2.2 Vervolg koppeling modellen.

We hebben nu de beschikking over de noodzakelijke invoer gegevens van één getijperiode. Door deze gegevens cyclisch te gebruiken kan toch een berekening over een langere periode gedaan worden. Omdat op 12 april 1989 gemiddelde getij - en meteorologische omstandigheden golden, lijkt deze aanpak gerechtvaardigd. We zijn ons er echter bewust van dat het cyclisch gebruiken van getij informatie geen ideale situatie is. Transport van slib richting het land van Saeftinge dat vooral tijdens springtij plaatsvindt zal op de beschreven wijze maar gedeeltelijk uit de verf komen. Ook transport naar hoger gelegen slikken en schorren zal niet volledig tot zijn recht komen. Aanbevolen wordt in de toekomst het transport van slib gedurende een springtij-doodtij cyclus te berekenen gebruik makend van een hydrodynamische berekening over deze periode. Dit zal ook meer inzicht verschaffen omtrent de geldigheid van de momenteel gehanteerde aanpak.

2.3 Beschikbare meetgegevens.

Zoals al eerder gememoreerd zijn er in de eerste dagen van april 1989 13-uurs metingen uitgevoerd in verschillende raaien in de Westerschelde, waarbij stroomsnelheden en slibconcentraties op verschillende dieptes bepaald zijn. Een overzicht van de lokaties per meetdag wordt gegeven in tabel 1.

Tabel 1: Lokaties van de verschillende meetschepen in geografische coördinaten op 4, 6, 10 en 12 april 1989.

\LOKATIE DATUM	AZTMPBV/ MO- LENVLIET	AZTMPDV/ STEEN- VLIET	AZTMPFV/ PLUIM- POT	AZTMPIV/ WIJT- VLIET	AZTMPJV/ SWA- LINGE
890404		x = 70882 y = 378238	x = 70494 y = 378953	x = 70658 y = 378627	x = 70981 y = 378034
890406	-	x = 44022 y = 375366	x = 45385 y = 378433	x = 43748 y = 374775	x = 45099 y = 377821
890410	x = 31238 y = 382672	x = 31182 y = 382013	x = 29916 y = 379644	x = 31360 y = 384260	x = 30189 y = 379978
890412	-	x = 70829 y = 378102	-	-	x = 71709 y = 378885

De bijbehorende modelcoördinaten worden gegeven in tabel 2.

Tabel 2: Lokaties van de meetschepen op 4, 6, 10 en 12 april in modelcoördinaten.

\LOKATIE DATUM	AZTMPBV/ MO- LENVLIET	AZTMPDV/ STEEN- VLIET	AZTMPFV/ PLUIM- POT	AZTMPIV/ WIJT- VLIET	AZTMPJV/ SWA- LINGE
890404	-	n = 174 m = 50	n = 173 m = 48	n = 174 m = 48	n = 175 m = 50
890406	-	n = 106 m = 56	n = 109 m = 49	n = 105 m = 58	n = 109 m = 50
890410	n = 74 m = 38	n = 74 m = 40	n = 71 m = 46	n = 74 m = 34	n = 71 m = 45
890412	-	n = 174 m = 50	-	-	n = 178 m = 48

De nummering van de lokaties zoals gebruikt in de figuren 4.1-4.4 is weergegeven in tabel 3. Door tabel 2 en 3 te combineren kunnen de modellokaties terug gevonden worden in de figuren 4.1-4.4.

Tabel 3: Nummering van de meetlokaties zoals weergegeven in figuren 4.1-4.4.

\LOKATIE DATUM	AZTMPBV/ MO- LENVLIET	AZTMPDV/ STEEN- VLIET	AZTMPFV/ PLUIM- POT	AZTMPIV/ WIJT- VLIET	AZTMPJV/ SWA- LINGE
890404	-	4	8	6	3
890406	-	5	11	2	8
890410	7	6	2	9	3
890412	-	6	-	-	8

Het getij verloop op de verschillende meetdagen is ter plaatse van de meetlokatie bepaald met het model. Deze getijkrommen zijn weergegeven in figuur 3.2.

In figuren 4.1 - 4.4 worden de posities van de schepen nogmaals gegeven. De figuren zijn afkomstig uit de datarapporten van de Meetdienst Zeeland (zie o.a. [Meetrapport, 1989a & 1989b]).

De stroomsnelheden die tijdens deze metingen bepaald zijn, zijn al eerder gebruikt bij de afregeling van het hydrodynamisch model en bleken goed weergegeven worden. De slibconcentraties worden met het model bepaald door het berekende getij van 12 april cyclisch te herhalen. Deze concentraties kunnen om twee redenen niet direct vergeleken worden met de gemeten concentraties:

- het getij op een lokatie voor 4, 6 en 10 april is niet in fase met het getij op die lokatie op 12 april. Vergelijking van slibconcentratie kan pas na het doen van een fase verschuiving.
- de sterkte van het opgetreden getij op 4, 6 en 10 april wijkt af van de getijsterkte op 12 april. Volgens figuur 3.1 is op al deze dagen het getij sterker dan gemiddeld. De dagen kunnen in oplopende sterkte als volgt geordend worden: 4 april → 10 april → 6 april.

De overige omstandigheden (meteorologie, rivierafvoer) zijn over de periode 4 - 12 april redelijk constant gebleven. Ondanks de bezwaren die eraan kleven slibconcentraties bepaald met het model op bovenstaande wijze te vergelijken met metingen, willen we een kwalitatieve vergelijking toch uitvoeren. Een rol speelt hierbij dat op 12 april zelf maar voor twee lokaties meetdata beschikbaar zijn. Door meer meetdata in de vergelijking te betrekken, wordt een ruimtelijker beeld van de kwaliteit van het model gegeven.

Onderzoek naar de trends in de slibconcentratie over de periode 1970-1990 is gerapporteerd in [Hilberink et al., 1996]. Gepoogd is een typisch getij signaal voor de slibconcentratie op een vaste lokatie te construeren om de beschikbare meetgegevens te corrigeren voor de getijfase. Wanneer daarnaast ook de seizoeninvloed uitgefilterd kan worden, kan de trend in de slibconcentratie als gevolg van antropogene maatregelen opgespoord worden. In het rapport wordt een getijsignaal gepresenteerd dat twee scherpe concentratie pieken vertoont bij het aantrekken van de stroomsnelheid. De eerste piek wordt veroorzaakt door erosie van het bovenste sliblaagje op de bodem (dat elk getij weer in suspensie geraakt). De verklaring voor de tweede piek luidde in eerste instantie dat slib uit het slib-zandmengsel op de bodem uitgefilterd zou worden, hetgeen pas bij hogere stroomsnelheden op zou treden. Deze hypothese werd echter al snel verworpen omdat de concentratie piek wijst op een abrupte toename in bodemschuifspanning, welke niet in de stroomsnelheden waarneembaar is. De nieuwe onderzoekshypothese die zijn geformuleerd richten zich op het effect van interne golven en de bijdrage van menging in de verticaal als gevolg van turbulentie. Het typische getij signaal dat is geconstrueerd, is echter op meerdere lokaties in de Westerschelde waargenomen waardoor het gebruikt kan worden voor modelvalidatie. De beperkte scala processen dat in het model opgenomen is kan hierbij roet in het eten gooien.

Naast deze 13-uurs meting hebben we de beschikking over "samengestelde gegevens". Zo bestaan er opnames van de bodemsamenstelling van de Westerschelde en Beneden Zeeschelde. De gebieden die uit de opnames slibrijk blijken te zijn, moeten in het model als sedimentatie gebieden naar voren komen. Om het globale gedrag van het slib-transportmodel te toetsen, leggen we de modelresultaten op lange termijn naast de slibbalans uit [Van Maldegem, 1993a & 1993b] die op basis van lithografische kaarten bepaald is. Tenslotte beschikken we over een kwalitatief beeld van het zwevend stof over het gehele estuarium uit Landsat opnames [Storm et al., 1995]. Deze opnames zijn op verschillende momenten in de getijfase gemaakt door de reflectie van een lichtsignaal aan het wateroppervlak te meten. Dit signaal is uitgezonden en opgevangen door een satelliet. De reflectiesterkte is een maat voor de

zwevend stofconcentratie.

2.4 Van slibmodel naar slibbalans.

Een beschrijving van het modelgebied is gegeven in paragraaf 2.1 en het bijbehorende modelrooster is terug te vinden in figuur 1. De bedoeling is nu, het slibtransport zoals dit met het fijnmazige slibmodel berekend is, te gebruiken in het waterkwaliteitsmodel. Het Schelde estuarium wordt voor waterkwaliteitsberekeningen echter zeer grof geschematiseerd. Dit modelrooster wordt het SAWES modelrooster genoemd en is weergegeven in figuur 5. Het transport van slib wordt in het waterkwaliteitsmodel opgedrukt door middel van een slibbalans. Deze balans bestaat uit twee delen: een balans voor het slib dat afkomstig is van zee (marien slib) en een balans voor het slib dat vanaf de rivier de Schelde aangevoerd wordt (fluviatiel slib). In de balans wordt vastgelegd hoeveel slib er tussen aangrenzende SAWES vakken uitgewisseld wordt.

Wanneer we nu per SAWES vak weten welke (fijnmazige) vakjes uit het slibmodel er binnen gelegen zijn, kan het resultaat van het slibmodel "geaggregeerd worden naar het SAWES modelrooster" (zie figuur 6). Dit komt er op neer dat de slibmassa van al de fijne vakjes die binnen een SAWES vak gelegen zijn opgeteld wordt. Door de totale slibmassa in een SAWES vak op verschillende tijdstippen te vergelijken, kan bepaald worden of de hoeveelheid slib toegenomen is danwel afgenomen is. Door deze informatie van alle SAWES vakken te combineren kan de slibbalans opgesteld worden.

2.5 Parameterinstelling van het slibmodel.

Aan het eind van de jaren tachtig zijn in het kader van slib-transportmodellering in de Westerschelde schattingen gemaakt van enkele modelparameters op basis van veldgegevens van het slibgedrag. Een groot aantal 13-uurs metingen is hiervoor geanalyseerd. Op basis van deze model-parameterwaarden zijn modelberekeningen van het slibconcentratie verloop in het estuarium uitgevoerd met een dieptegemiddeld (2Dh) model. De resultaten zijn gerapporteerd in [Mulder en Udink, 1991]. De methoden die gebruikt zijn bij het schatten van de relevante parameters zijn terug te vinden in [Mulder, 1995]. In dit document wordt een bereik van parameter waarden gegeven voor de volgende grootheden:

- de valsnelheid van het slib
- een erosie coëfficiënt

Voor het schatten van deze parameters zijn aannames gedaan omtrent de waarden van:

- de kritische schuifspanning voor sedimentatie
- de kritische schuifspanning voor erosie

Uit de analyses is gebleken dat de parameterwaarden variëren over het estuarium. Vooral de waarde van de erosie coëfficiënt gaf een sterke toename te zien vanuit het oostelijk - naar het westelijk deel van het estuarium. Een mogelijke verklaring hiervoor is het verschil in slibgedrag tussen marien - en fluviatiel materiaal. Ook het feit dat geulen eb - of vloed gedomineerd kunnen zijn kan een rol spelen. We spreken al helemaal niet over eventueel tijd (getij) afhankelijke parameters.

De parameter waarden die in [Mulder, 1995] gepresenteerd worden, hebben aan de basis gestaan van de uiteindelijk gebruikte parameterwaarden in het 3D slib-transportmodel. Deze parametersetting heeft ook aan de basis gestaan van eerdere modelberekeningen door [Cancino en Neves, 1994] en [Portela en Neves, 1994]. Op enkele punten is er echter van afgeweken. Zo is zowel de kritische schuifspanning voor erosie als voor sedimentatie lager gekozen dan vermeld wordt in [Mulder, 1995]. Vooral de kritische schuifspanning voor sedimentatie is hier aan de hoge kant. Een andere reden is dat we met een hydrodynamisch veld behorend bij een gemiddelde getij omstandigheid ook de springtij condities weer willen geven. Hiertoe zijn de lagere waarden voor de kritische schuifspanningen noodzakelijk.

Bij de bepaling van de fluviale slibbalans is in de Beneden Zeeschelde de kritische schuifspanning voor erosie en sedimentatie aangepast. Voor een betere doorstroming van het slib afkomstig van de rivier de Schelde bij Rupelmonde naar het stroomafwaarts gelegen gebied, zijn beide kritische schuifspanningen iets verlaagd.

Ook zijn we genoodzaakt geweest lokale aanpassingen te doen op de parameter waarden in verband met model-artefacten. Vooral in het rechthoekige gedeelte van het grid zijn aan de modelranden een aantal kunstmatige "slibputten" aanwezig. Om ophoping van slib in deze putten te voorkomen is ter plaatse de sedimentatie uitgeschakeld.

Met behulp van de relatie gegeven in vergelijking (3) zijn de kritische schuifspanningen omgerekend naar een kritische (bodem)snelheden. Zo zijn we tot de volgende waarden gekomen waarmee een eerste modelberekening gedaan is:

Tabel 4: Globale weergave van de modelparameters, gespecificeerd per gebied.

	Kritische snelheid voor sedimentatie (in m/s)	Valsnelheid (in m/s)	Kritische snelheid voor erosie (in m/s)	Erosie coëfficiënt (in kg/m ² s)
Westelijk van Terneuzen	0.25	$1.0 \cdot 10^{-3}$	0.30	$1.0 \cdot 10^{-3}$
Oostelijk van Terneuzen	0.25	$1.0 \cdot 10^{-3}$	0.30	$1.0 \cdot 10^{-4}$
Beneden Zeeschelde	0.20	$1.0 \cdot 10^{-3}$	0.25	$1.0 \cdot 10^{-4}$

Naast de modelparameters dient aan het model voorgeschreven te worden wat de slibconcentratie is van het water dat het model binnen stroomt. Zowel aan de rivierzijde als aan de zeezijde van het model dient hiertoe een randconcentratie opgegeven te worden. Uitgaande van de gegevens in [Van Maldegem, 1993a] is tot de volgende (dieptegemiddelde) waarden besloten:

- randconcentratie voor de Schelde: 100 mg/l
- randconcentratie aan de zeezijde: 50 mg/l

Als randconcentratie aan de zeezijde van het model is een representatieve waarde voor het traject Vlissingen Breskens genomen. De randconcentratie voor het Schelde water is iets lager dan (jaar)gemiddeld genomen omdat het rivierdebiet in de simulatie periode wat hoger dan (jaar)gemiddeld is.

Met deze parameterinstelling en randvoorwaarden wordt de eerste transport berekening van slib in het schelde estuarium uitgevoerd.

2.6 Aanpak slibberekening.

2.6.1 Balans bepaling.

In de Inleiding is al aangegeven dat met het slibmodel de constructie van de slibbalans voor het gehele estuarium beoogd wordt. Ook is aangegeven dat het een aantal maanden duurt voordat slib dat van de rivier de Schelde afkomstig is in enige mate de zee bereikt. Het ligt dan voor de hand aan het begin (initieel) van de modelberekening in het gehele modelgebied een zekere hoeveelheid slib aan te brengen, zodat de inspeeltijd verkleind wordt. Hier ontstaat echter een probleem. Het model kan per berekening slechts één slibfractie (soort) tegelijk aan. De constructie van de totale balans vergt dus twee berekeningen, één voor de mariene fractie en één voor het fluviatiel slib. Wanneer we nu de balans voor het fluviatiel slib willen bepalen en we initieel (fluviatiel) slib in het gehele model brengen, is het niet te vermijden dat we in (delen van) het gebied aan de zeezijde van het estuarium initieel te veel fluviatiel slib aanbrengen. Omdat het geruime tijd duurt voordat fluviatiel slib vanaf de bron (Schelde) in voldoende mate naar deze regionen getransporteerd is, zal het aan het "begin" van de berekening lijken alsof fluviatiel slib vanaf zee stroomopwaarts getransporteerd wordt. Dit "begin" vergt in de praktijk dagen rekentijd, wat de methode onhanteerbaar maakt.

N.B.: In werkelijkheid wordt er zeker wel slib vanaf zee stroomopwaarts getransporteerd. Dit is echter marien slib. Dit onderscheid kan echter niet door het model gemaakt worden.

Iets soortgelijks doet zich voor bij bepaling van de mariene balans, waar het bij het initieel aanbrengen van marien slib in het aan de rivierzijde van het model lijkt dat marien slib vanaf de Schelde afkomstig is.

De enige manier om dit probleem te vermijden is af te zien van het initieel aanbrengen van slib in het modelgebied. We starten de berekeningen van beide balansen met een "leeg" estuarium en laten het estuarium "vollopen" door per balans één bron op één van de randen actief te laten zijn. Na honderd getijden is in beide gevallen het gehele estuarium in zekere mate gevuld. De slibverdeling wordt vastgelegd. De berekening wordt daarna nog 180 getijden voortgezet ($\pm 1/4$ jaar). De slibverdeling die nu bereikt is wordt vergeleken met de situatie na 100 getijden. Aan de hand van de verschillen in de hoeveelheid slib in de modelvakken, kan de slibbalans bepaald worden. Een nadeel van deze methode is dat het te lang duurt om voldoende fluviatiel slib aan de zeezijde van het model te krijgen ten einde een betrouwbare fluviatiele balans op te stellen. De simulatietijd wordt geschat op enkele jaren, wat neerkomt op een paar weken rekentijd. Bij bespreking van de resultaten wordt op dit punt terug gekomen.

2.6.2 Vergelijking met 13-uurs metingen.

Vergelijking van modelresultaten met de gegevens uit de 13-uurs metingen is van groot belang om de modelparameters (lokaal) aan te passen. Wanneer we deze vergelijking willen uitvoeren is het niet meer van belang onderscheid te maken tussen fluviatiel - en marien slib. Het volstaat om slechts één slibfractie in beschouwing te nemen. De modelberekening die hieraan ten grondslag ligt kan daarom met initieel aanwezig slib uitgevoerd worden, hetgeen prettig is met het oog op de rekentijden. Zowel aan de zeerand als aan de rivierand van het model wordt een slibconcentratie opgelegd (zie 2.5), waarna er 100 getijden doorgerekend wordt. Na 100 getijden veranderen de ruimtelijke patronen niet meer. Slechts de hoeveelheid gesedimenteerd slib neemt nog toe. Deze periode is van de zelfde orde grootte als de verversingstijd van het estuarium, welke aan de hand van [Dronkers en Zimmerman, 1982] op 2 à 3 maanden geschat wordt. Gecontroleerd zal worden of de modelresultaten die

op deze wijze verkregen worden consistent zijn met de resultaten van de balans berekeningen. In dit laatste geval zal naar totaal concentratie (fluviaal + marien) gekeken worden. Het concentratie verloop over het getij en het concentratie profiel zullen op een aantal lokaties vergeleken worden.

3. De modelresultaten

In paragraaf 2.3 is een opsomming gegeven van de beschikbare meetgegevens ter controle van de modelresultaten. Om het intra-getij gedrag van het model te verifiëren (concentratie verloop, erosie-depositie cyclus en verticale concentratie profielen), worden data gebruikt die bij 13-uurs metingen bepaald zijn (zie [Meetrapport, 1989a & 1989b]). Het globale slibconcentratie patroon kan vergeleken worden met Landsat opnames [Storm et al, 1995] welke een synoptisch beeld geven. Voor verificatie van het lange termijn gedrag van het model wordt vooral naar bodemgegevens gekeken. Voorhanden zijn lithografische kaarten van de Westerschelde voor verschillende perioden. De slibbalans [Van Maldegem, 1993a] is bepaald op grond van de koolstof-isotopenverhouding $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ van het slib afkomstig uit bodem monsters.

De methode om het fjnshalige modelresultaat om te zetten naar de SAWES schematisatie is al besproken in paragraaf 2.4 (zie ook figuur 6). De vaknummers die in het vervolg gehanteerd worden, hebben betrekking op deze schematisatie. Bespreking van de modelresultaten zal volgens bovenvermelde onderverdeling plaats vinden in de volgende paragrafen.

3.1 De slibbalans bepaald door het model.

In figuur 7 is de slibbalans van Van Maldegem weergegeven. Karakteristieke kenmerken zijn de grootte van de import van marien slib, de hoeveelheid fluviaat slib dat aangevoerd wordt, de grootte van het slibtransport over de Belgisch-Nederlandse grens, de afstand van de grens tot waar marien slib de Beneden Zeeschelde binnendringt en sedimentatie en erosie.

De netto import van marien slib wordt bepaald door het verschil tussen de bruto import bij vloed en de bruto export bij eb. De grootte van deze term is erg moeilijk te sturen in een model. Van invloed zijn de waarde van de randconcentratie en getij asymmetrie. Beter te sturen is de aanvoer van fluviaat slib naar de beneden Zeeschelde. Aan het rivieruiteinde van het estuarium is de getijinvloed bijna geheel verdwenen, waardoor de aanvoer van slib bepaald wordt door het product van rivierdebiet en slibconcentratie.

De grensoverschrijdende transporten moeten in een model vanzelf naar voren komen (hydrodynamica en de slibconcentraties bij eb en vloed).

Een probleem komt er om de hoek kijken bij de modelmatige weergave van de gemeten erosie en sedimentatie hoeveelheden. Dit hangt samen met de gekozen methodiek uit paragraaf 2.6. Omdat er initieel geen slibvoorraad in de bodem van het model aanwezig is (al het slib op de bodem van het model wordt door sedimentatie veroorzaakt), kan slib erosie uit de bodem niet door het model gerepresenteerd worden. Met de balans van Van Maldegem in de hand zal de modelmatig bepaalde slibbalans hiervoor gecorrigeerd dienen te worden (zie 3.1.2). Dit zal vooral gelden voor de vakken 6 en 13. De weergave van sedimentatie door het model levert geen probleem op.

3.1.1 Modelresultaten.

Het uiteindelijk modelresultaat is weergegeven in figuur 8. Dit resultaat is niet bij de eerste poging tot stand gekomen ofschoon een aantal zaken van begin af aan goed door het model werden weergegeven. Al in de eerste modelberekeningen is gebleken dat zowel de aanvoer van fluviaat slib als de aanvoer van marien slib erg goed vergelijkbaar was met de gegevens van Van Maldegem. De fluviaatle aanvoer lijkt aan de hoge kant maar dit wordt deels

veroorzaakt doordat in deze term ook de zijdelingse belasting en erosie van oevers stroomopwaarts in de Beneden Zeeschelde verwerkt is. Een andere oorzaak is het rivierdebiet dat wat hoger dan jaargemiddeld is. Door de fluviatiele aanvoer te schalen naar de gemeten waarde kan een betere vergelijking tussen het model en de balans van Van Maldegem gemaakt worden. Bij deze schaling wordt elke term in de modelbalans vermenigvuldigd met de factor die tussen de gemeten fluviatiele aanvoer en de modelwaarde zit. De slibbalans na schaling is te vinden in figuur 9.1.

De grensoverschrijdende transporten van fluviatiel - en marien slib worden zeer goed gerepresenteerd. Het zelfde geldt voor de afstand tot waar de invloed van marien slib op Belgisch grondgebied merkbaar is. Ook hier speelt de grootte van de rivierafvoer een rol. Vanwege de relatief hoge waarde van het rivierdebiet is het troebelingsmaximum dicht tegen de Belgisch-Nederlandse grens aan komen te liggen. Bij gemiddelde rivierafvoer kan het mariene slib iets verder stroomopwaarts geraken.

De verdeling van de sedimentatie hoeveelheden over de verschillende vakken behoefde hier en daar wat bijstelling. Dit gold met name in het gebied rond Bath (vakken 6-8). Door aanpassing van de kritische snelheden voor erosie en sedimentatie werd bewerkstelligd dat een deel van de sedimentatie in vak 6 verschoof naar vakken 7 en 8. De sedimentatie in vak 6 kon niet geheel teniet gedaan worden. In de werkelijkheid wordt netto erosie namelijk veroorzaakt door een dominantie van erosie ten opzichte van sedimentatie. Omdat het model erosie niet goed weergeeft, kan de sedimentatie niet gecompenseerd worden. Hiervoor dient nog gecorrigeerd te worden (zie 3.1.2).

De meest opvallende afwijking van het modelresultaat ten opzichte van de "gemeten" balans is de hoeveelheid fluviatiel slib dat stroomopwaarts van vak 9 terecht komt. Het lijkt alsof vak 9 als vergaarbak voor het fluviatiel slib optreedt. Dit fenomeen kan niet veroorzaakt worden door de sedimentatie karakteristiek ter plaatse. Deze is namelijk gelijk voor de fluviatiele en mariene slibfracties en in vak 9 vindt nauwelijks sedimentatie van marien slib plaats. De verklaring moet in de hydrodynamica gevonden worden. In figuur 10 is het reststroompatroon aan het wateroppervlak en aan de bodem voor een deel van de Westerschelde gegeven. Vooral aan de bodem (waar het meeste slib zich bevindt) is een sterke wervelstructuur waar te nemen op het grensgebied tussen de vakken 9 en 10. Aan het wateroppervlak is deze wervelstructuur minder prominent, maar ook hier is in het vloed gedomineerde deel van het geulenstelsel de reststroming het estuarium in gericht. Daarbij komt nog dat in het model maar één slibfractie gemodelleerd wordt: slib met een gemiddelde korrelgrootte. Uit analyse van de concentratie patronen over het getij (zie figuren 11.1 en 11.2) volgt dat ongeveer een derde deel van het slib permanent in suspensie blijft. De verspreiding van deze fractie zal deels bepaald worden door de hydrodynamica in de bovenste helft van de waterkolom en daarmee wel verder stroomafwaarts kunnen geraken. Deze fractie wordt niet in de berekening meegenomen (daarbij komt nog dat de menging van slib naar hogere delen van de waterkolom nog niet goed in het model verloopt). Dit vormt een verklaring voor de sterke ophoping van fluviatiel slib in deze omgeving.

3.1.2 Correcties in de slibbalans voor gebieden met erosie.

Zoals al aangegeven dient de slibbalans die uit de modelberekening rolt op een aantal plaatsen aangepast te worden. Het betreft gebieden waar volgens de balans van [Van Maldegem, 1993a] erosie optreedt. De aanpassing blijft beperkt tot de vakken 6, 9 en 13.

Voor vak 6 is besloten de slib sedimentatie in de fluviatiele balans die het model berekent te verwijderen en (naar ratio) te verdelen over vakken 7 en 8. Op deze wijze treedt noch erosie noch sedimentatie van fluviatiel slib op in vak 6. In de mariene balans is de sedimentatie in de vakken 6 en 9 in zijn geheel

overgeheveld naar vak 8. Op deze wijze komt de slib sedimentatie in het land van Saeflinge beter tot zijn recht. Omdat de hydrodynamische berekening bij gemiddeld tij gedaan is, kan de overstroming van dit gebied met slibrijk water tijdens springtij niet gerepresenteerd worden. Juist in deze periode is de sterkste sedimentatie te verwachten.

Tot hier zijn de correcties beperkt gebleven tot het overhevelen van sedimentatie van een vak naar een ander vak. Volgens Van Maldegem is in vak 13 de erosie van zowel marien - als fluviatiel slib zo groot dat besloten is $150 \cdot 10^6$ kg extra erosie in vak 13 te laten plaats vinden.¹ Dit materiaal wordt verdeeld over vak 14 ($100 \cdot 10^6$ kg) en vak 11 ($50 \cdot 10^6$ kg). Voor de sedimentatie in vak 14 is geen fysische argumentatie te verzinnen. Het doet echter recht aan de gegevens die uit de balans van Van Maldegem naar voren komen. Wanneer ook deze correcties in de slibbalans verwerkt worden, is het uiteindelijke resultaat zoals weergegeven in figuur 9.2. Het verdient de aanbeveling het effect van deze aanpassing bij gebruik van de slibbalans in een waterkwaliteitsmodel te onderzoeken.

In tabel 5 zijn de verschillende balansen naast elkaar gezet. Zo kan een beeld verkregen worden van het effect van schaling en van correcties voor slib erosie op de modelmatig verkregen balansen.

Tabel 5: Effect van handmatige aanpassingen op de modelmatig verkregen slibbalans van de Westerschelde.

Vakgrens	[DvM]zee	[DvM]riv	Modzee	Modriv	Modzee schaling	Modriv schaling	Modzee aangepast	Modriv aangepast
0 - 1	0	263	0	429	0	343	0	343
1 - 2	0	294	0	429	0	343	0	343
2 - 3	0	325	0	429	0	343	0	343
3 - 4	8	343	1	396	1	317	1	317
4 - 5	40	328	1	395	1	316	1	316
5 - 6	83	298	89	377	82	301	82	301
6 - 7	76	322	157	295	145	236	82	301
7 - 8	119	277	181	274	167	219	104	254
8 - 9	268	150	239	176	220	141	239	141
9 - 10	248	162	260	33	239	26	239	162
10 - 11	241	166	268	14	247	11	247	166
11 - 12	369	109	294	8	271	6	321	109
12 - 13	374	107	327	0	301	0	351	107
13 - 14	215	243	343	0	316	0	216	243
14 -	324	223	352	0	324	0	324	223

Kolom 1&2: balans zoals bepaald op basis van metingen [Van Maldegem, 1993a]

Kolom 3&4: balans bepaald met model.

Kolom 5&6: balans bepaald met model geschaald naar mariene en fluviatiele aanvoer zoals in [Van Maldegem, 1993a].

Kolom 7&8: balans bepaald met model op een aantal plaatsen handmatig aangepast. Deze aanpassingen bestaan uit:

- extra sedimentatie (100 Mkg) in vak 14 in de mariene balans.
- extra sedimentatie (50 Mkg) in vak 11 in de mariene balans.

¹ Uit [Van Maldegem, 1993a] wordt niet duidelijk of het natuurlijke erosie of "erosie door zandwinning" betreft. Bij zandwinning wordt namelijk ook slib aan het systeem onttrokken.

- extra erosie (150 Mkg) in vak 13 in de mariene balans.
- sedimentatie in vakken 6&9 is overgeheveld naar vak 8 in mariene balans.
- sedimentatie in vak 6 is overgeheveld naar de vakken 7&8 (naar ratio) in de fluviatiele balans.
- de fluviatiele balans is met model bepaald tot grens vak 8/9; daarna balans volgens [Van Maldegem, 1993a].

3.1.3 Concentratie gedurende het getij in de verschillende SAWES vakken.

In deze paragraaf wordt iets verder ingegaan op de resultaten van de balansberekeningen en wordt stilgestaan bij het erosie-depositie gedrag in de SAWES vakken. De balans bepaling heeft plaats gevonden op basis van een slibtransport berekening over vele getijden. Het is een kleine moeite om voor het laatste berekende getij het verloop van de slibconcentratie en de slib sedimentatie per SAWES vak weer te geven. Dit is gedaan in de figuren 11.1 en 11.2. Uit deze figuren blijkt ook duidelijk de verdeling van het slib over de waterfase en de bodem. Erosie blijkt meestal een "lokaal" fenomeen te zijn: een piek in de slibconcentratie gaat samen met een afname van de hoeveelheid slib op de bodem in hetzelfde vak. Grote overeenkomsten zijn in figuur 11.1 te zien tussen het concentratie verloop van marien en fluviatiel slib. Een uitzondering moet gemaakt worden voor vak 5. In de mariene balans treedt er in dit vak een sterke sedimentatie op die niet terug te vinden is in de fluviatiele balans. De lokatie van dit vak valt samen met het verste bereik van het mariene slib. Gezien het reststroomp patroon aan de bodem uit figuur 10 is dit niet verbazingwekkend. Hier treedt convergentie van de stroming aan de bodem op waardoor accumulatie van sediment plaatsvindt. Stroomopwaarts van vak 5 vinden we nauwelijks nog marien slib.

Dit resultaat is ook consistent met eerdere berekeningen van de saliniteitspatronen ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens [Salden en Yang, 1996]. In dit gebied bevindt zich de maximale (horizontale) saliniteitsgradiënt en treedt zout stratificatie op bij kentering van de stroming na hoogwater.

In figuur 11.2 is het fluviatiel en marien slib samengenomen en is het concentratie verloop gedurende het getij weergegeven. Voor de vakken 3 - 9 geldt dat het verloop zeer goed overeenkomt met de gegevens die in bijlage 7 van [Van Maldegem, 1993a] gepresenteerd worden. Zowel de maximale als minimale massa slib in suspensie is goed vergelijkbaar. De concentraties in vakken 1 en 2 zijn iets aan de lage kant. Stroomafwaarts van vak 9 wordt het concentratie verloop beïnvloed door de afwezigheid van fluviatiel slib ter plaatse. Het transport van marien slib vanuit de vakken 13 en 14 stroomopwaarts blijkt erg snel te verlopen. Zo snel zelfs dat vakken 13 en 14 niet de kans krijgen op te laden. De slibconcentratie blijft danook erg laag. In tabel 6 zijn de (veld)gegevens uit Van Maldegem en de modelresultaten uit figuur 11.2 nog eens naast elkaar gezet.

In paragraaf 3.2.1 waar vergelijking van de twee berekeningsmethoden (zie paragraaf 2.6) aan de orde is, zullen we nog terugkomen op het concentratie verloop in de SAWES vakken gedurende het getij.

Tabel 6: Veldgegevens van bijlage 7 van [Van Maldegem] en modelresultaten uit figuur 11.2.

	Vak 1	Vak 2	Vak 3	Vak 4	Vak 5	Vak 6	Vak 7	Vak 8	Vak 9	Vak 10	Vak 11	Vak 12	Vak 13	Vak 14
Maximale massa in suspensie in kg [Van Maldegem]	$5.8 \cdot 10^4$	$5.8 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^7$	$4.5 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^7$	$1.5 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^7$	$1.7 \cdot 10^7$	$3.7 \cdot 10^7$	$3.7 \cdot 10^7$	$6.8 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^8$
Maximale massa in suspensie in kg in het model	$1.3 \cdot 10^6$	$1.7 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^7$	$6.0 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^7$	$7.0 \cdot 10^6$	$4.5 \cdot 10^6$	$5.5 \cdot 10^6$	$5.0 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^7$
Minimale massa in suspensie in kg [Van Maldegem]	$1.6 \cdot 10^4$	$1.9 \cdot 10^4$	$3.7 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^6$	$4.8 \cdot 10^6$	$3.4 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$	$2.9 \cdot 10^6$	$2.8 \cdot 10^6$	$4.3 \cdot 10^6$	$9.9 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^7$	$2.2 \cdot 10^7$	$3.2 \cdot 10^7$
Minimale massa in suspensie in kg in het model	$4.0 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^6$	$7.5 \cdot 10^6$	$4.0 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$	$3.0 \cdot 10^6$	$4.0 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^6$	$4.0 \cdot 10^6$

3.2 Het gedetailleerde slibmodel: getij verloop & profielen.

Zoals in paragraaf 2.6 is aangegeven, is er voor de vergelijking van de modelresultaten met de 13-uurs metingen een aparte berekening uitgevoerd. De reden hiervoor is dat in de 13-uurs metingen de fluviatiele - en mariene slibfractie samengenomen wordt en de totale slibconcentratie bepaald wordt. Het gaf praktische bezwaren de modelresultaten voor berekeningen van de fluviatiele - en mariene fracties (zie paragraaf 3.1.1) samen te voegen tot één modelresultaat. De slibmassa die initieel in het model is aangebracht is zodanig gekozen dat volledige erosie van deze hoeveelheid slib voor een concentratie van 100 mg/l zou zorgen.

De modelparameter-instelling voor deze berekening is gelijk aan de waarden die in tabel 4 voor de balans bepaling gebruikt zijn. De aanpassing in de Beneden Zeeschelde is echter achterwege gelaten. Alle parameters in het slibmodel hebben invloed op het verloop van de slibconcentratie gedurende een getij en voor het concentratie profiel over de waterkolom. De kritische waarden voor erosie en sedimentatie bepalen het moment waarop een concentratie piek ontstaat c.q. begint te verdwijnen. Bij dit laatste punt speelt ook sediment beschikbaarheid een rol. De snelheid waarmee het beschikbare slib erodeert (de tijd die nodig is de piekconcentratie te bereiken), wordt bepaald door de erosie constante. Tenslotte legt de valsnelheid het moment vast vanaf wanneer de turbulente menging over de waterkolom te klein is om het slib in suspensie te houden. Ook de positie in de waterkolom van de slibdeeltjes wordt door deze twee krachten bepaald. In paragraaf 2.2.1 is al gememoreerd dat in het model de menging van het slib over de waterkolom door de turbulentie te langzaam verloopt. We verwachten dan ook dat de concentratie profielen "uitgezakt" zullen zijn en dat de slibconcentratie aan het wateroppervlak over het algemeen aan de lage kant zal zijn.

Een andere reden waardoor de slibconcentratie aan het wateroppervlak beïnvloed wordt, is het feit dat er maar één slibfractie in het model gemodelleerd kan worden. Deze fractie representeert slib met een gemiddelde korrelgrootte. In werkelijkheid is het juist de fijne slibfractie die de grootste bijdrage levert aan de concentratie aan het wateroppervlak. Ook de waarde van de achtergrondconcentratie (de concentratie die bij lage stroomsnelheden resteert) wordt hierdoor beïnvloed.

3.2.1 Modelresultaten.

Om een eerste indruk te krijgen van de modeluitkomsten en om een globale vergelijking te maken met de in paragraaf 3.1 beschreven resultaten, is wederom een aggregatie naar het SAWES modelrooster uitgevoerd. Het verloop van de slibmassa op de bodem en in de waterfase gedurende het getij voor elk SAWES vak is weergegeven in figuur 12. Wanneer deze figuur naast figuur 11.2 gelegd wordt, komen grote overeenkomsten naar voren. Vooral voor het patroon in het slibconcentratie verloop is dit het geval. De piekconcentraties echter vertonen in een aantal vakken afwijkingen. Dit is met name het geval in de SAWES vakken 3,4,5 en 9.

Een verklaring voor dit verschijnsel is niet eenvoudig gevonden. De massa slib in suspensie in het gehele estuarium verschilt voor de berekeningen behorend bij de figuren 11.2 en 12 nauwelijks. De oorzaak zal een lokaal karakter moeten hebben.

In de vakken 4 en 5 is in figuur 11.2 meer variatie in slibconcentratie aanwezig dan in figuur 12. De maximale concentraties in deze vakken zijn in figuur 11.2 een factor twee hoger dan in figuur 12, de minimale waarden zijn in beide figuren vergelijkbaar. Het lijkt er op dat de aanpassing in het erosie criterium in de Beneden Zeeschelde (zie tabel 4) een rol speelt. Een lagere kritische erosie snelheid in de berekening behorend bij figuur 11.2 in combinatie met een voldoende hoeveelheid beschikbaar sediment, is verantwoordelijk voor

hogere slibconcentraties. De hogere piekconcentratie in vak 3 tijdens de tweede helft van de getij cyclus (vloedfase) wordt mogelijk beïnvloed door advectie van sediment vanuit de vakken 4 en 5.

De hogere piekconcentratie in vak 9 (veel fluviatiel materiaal) heeft vermoedelijk te maken met de "vergaarbakfunctie" (zie paragraaf 3.1.1) die dit vak heeft voor fluviatiel slib als gevolg van de aanwezige restcirculatie aan de bodem. De langere periode waarover de rivier in de berekening voor figuur 11.2 als bron van fluviatiel slib actief is geweest, heeft geleid tot meer slib in het "vergaarvak" 9.

Ondanks de verschillen die geconstateerd zijn in het concentratie verloop over het getij in een aantal SAWES vakken, mag toch geconcludeerd worden dat de twee berekeningsmethoden consistent zijn, en dat de vergelijking met meetdata op basis van de resultaten van de modelberekening met een initiële slibmassa gedaan kan worden.

3.2.2 13-uurs metingen.

In paragraaf 2.3 zijn de meetdata vermeld die beschikbaar zijn voor validatie van de modelgegevens. Voor de verschillende meetperiodes is per lokatie het concentratieverloop over het getij bepaald, afhankelijk van de diepte waarop de meting uitgevoerd is. Niet overal hebben de meetinstrumenten gedurende de gehele meetperiode goed gefunctioneerd. In de "gaten" is de concentratie op nul gesteld.

Al eerder is opgemerkt (zie 2.2.1) dat het mengmechanisme over de waterkolom in het model niet goed functioneerde. Bij vergelijking van de modelresultaten met de meetgegevens zal daarom het accent gelegd worden op de weergave van de concentratiepieken die gedurende het getij optreden. Slechts een globale vergelijking van de concentratiewaarden zal gedaan worden. De verwachting is dat de overeenkomsten aan de bodem van het estuarium het grootst zullen zijn. Bespreking van de resultaten zich daarom hierop concentreren.

4 April.

Voor deze dag is er op vier lokaties in de omgeving van Bath gemeten. Aanvang van de meting was een uur voor laagwater. De meetpunten liggen op minder dan een kilometer van elkaar. In het model is het concentratieverloop bepaald in het roosterpunt dat het dichtst bij de meetlokatie was gelegen. De modelresolutie (400 m) en de zeer scherpe overgang tussen geul en plaat in de omgeving van Bath kan aanleiding zijn tot aanmerkelijke verschillen. De diepte waarop de meting uitgevoerd is, correspondeert in het algemeen niet met de diepte waarop in het model de concentratie berekend is. Met dit in het achterhoofd is het concentratieverloop uit de meting naast het modelresultaat in een figuur gezet (13.1-13.4).

De overeenkomst in figuur 13.1 en 13.2 is heel aardig. De piekmomenten komen redelijk overeen, de globale concentratie eveneens. De sterkste pieken in concentratie treden vlak voor - en vlak na laagwater op. De verhouding in pieksterkte laat meer afwijking zien. Voor de twee ander lokaties (13.3 en 13.4) is het verschil wat groter. Toch zijn ook hier overeenkomsten aanwezig in de patronen. Opvallend is dat het model voor deze twee lokaties wel een sterke menging over de waterkolom weergeeft.

6 April.

Ook op deze dag is op vier lokaties gemeten, in de omgeving van Terneuzen. Aanvang van de meting was ongeveer 2 uur voor laagwater. Wederom kan het uitmaken in welk roosterpunt de vergelijking met de meting plaatsvindt vanwege de fijschalige topografische structuren die niet in het model gerepresenteerd worden.

In figuren 14.1-14.4 is het modelresultaat naast de meting gezet. Goede overeenkomsten vertonen de figuren 14.1 en 14.2. Deze meetlocatie zijn beide midden in een geul gelegen, waardoor variatie in topografie minder belangrijk is (zie figuur 2). De metingen in figuren 14.3 en 14.4 zijn tegen de oever respectievelijk op de geulrand gelegen. Dit beïnvloedt de modeluitkomst aanzienlijk. In beide punten is in het model nauwelijks slib aanwezig.

10 April.

In de omgeving van Vlissingen zijn op deze dag op vijf lokaties instrumenten ingezet. Start van de meting was op ongeveer een uur na hoogwater. De resultaten zijn geven in figuren 15.1-15.5. Drie van de vijf instrumenten hebben echter een (groot) deel van de tijd niet gefunctioneerd, hetgeen vergelijking van de pieken in het signaal met het model bemoeilijkt. Van de resterende twee lokaties is er een waarin het model goede overeenkomst met de meting vertoont. Zowel het aantal pieken en het moment van optreden als de concentratie aan de bodem worden redelijk weergegeven (zie figuur 15.1). Deze lokatie is eveneens in een geul gelegen.

12 April.

Op 12 april is er wederom gemeten in de omgeving van Bath. Slechts twee instrumenten hebben op deze dag gefunctioneerd. Start van de meting was ongeveer een uur voor hoogwater. De resultaten zijn gegeven in figuren 16.1 en 16.2. Het meetpunt in figuur 16.1 was in de Schaar van de Noord gelegen, het meetpunt uit figuur 16.2 op de plaat van Saeftinge. Het modelresultaat in figuur 16.1 komt erg goed overeen met de meting. De concentratiepieken uit de meting zijn bijna allemaal terug te vinden in het modelresultaat. Ook de concentratie is in de onderste helft van de waterkolom vergelijkbaar. De kan te maken hebben met het feit dat de hydrodynamica bepaald is voor 12 april. De getijomstandigheden komen dus overeen met de werkelijkheid. Het resultaat wordt in dit geval niet beïnvloed door het feit dat het slibmodel cyclisch gebruik maakt van één hydrodynamisch veld.

Algemeen.

De overall indruk is dat de mate waarin met modelresultaat overeenkomt met de meting sterk afhangt van de lokatie van het meetpunt. Het model is redelijk in staat een meting uitgevoerd in een geul te reproduceren (zie figuren 13.1, 14.1 en 14.2, 15.1, 16.1). Voor lokaties gelegen in een gebieden met een grillige topografie (figuur 2) is de afwijking tussen model en meting vaak veel groter. De modelresolutie speelt hierbij een grote rol.

De concentratie heeft in het model een gladder verloop dan in werkelijkheid. Kleine concentratiepieken die in de metingen naar voren komen zijn niet terug te vinden in het model. Dit heeft te maken met de tijdstap waarmee de modelberekening gedaan is, en waarschijnlijk ook met de beperktheid van de procesformuleringen in het model. Een concentratiepiek treedt op in het model wanneer de stroomsnelheid voldoende groot is en er sediment in de omgeving beschikbaar is. In werkelijkheid is het iets gecompliceerder (zie [Hilberink, 1996]). Opvallend is dat het model wel in staat is smalle pieken weer te geven.

Het cyclisch gebruik van een gemiddeld getij lijkt vooralsnog weinig effect te hebben op de concentraties. Er zijn andere factoren die het concentratie verloop in sterkere mate beïnvloeden. De voornaamste hiervan is de verticale menging. Wanneer dit proces beter gemodelleerd is, zal het cyclisch gebruik van een getij nogmaals tegen het licht gehouden dienen te worden.

3.2.3 Concentratie profielen.

Een 3D model is bij uitstek geschikt om ook het concentratie profiel over de

waterkolom te berekenen. Dit kan inzicht verschaffen in de processen die verantwoordelijk zijn voor bijvoorbeeld erosie, en de rol die de stroming hierin speelt. Omdat al aangegeven is dat de verticale uitwisseling van sediment momenteel niet goed in het model verloopt, is het geen zinnige gedachte voor alle meetlocaties het concentratieprofiel gedurende het getij weer te geven. Ik beperk me daarom tot die locaties waar het concentratie verloop in het getij redelijk goed weergegeven wordt (zie 3.2.2). Voor elke meetperiode wordt in één lokatie het verloop van het concentratieprofiel vergeleken met de modeluitkomst. De resultaten zijn weergegeven in de figuren 17.1-17.8. Er lijkt zo op het eerste gezicht maar weinig overeenkomst te bestaan tussen de meetgegevens en de modelresultaten. Waar in de meetdata relatief veel periodes aan te wijzen zijn waarover de waterkolom homogeen gemengd is, geeft de modeluitkomst bijna altijd een sterke concentratie gradiënt te zien. De oorzaak hiervan is al eerder gegeven. Toch is het weer een signaal dat de verticale uitwisseling van slib nog veel aandacht behoeft. Uitgezocht zal moeten worden of de oorzaak alleen in een foutieve implementatie van het turbulentie model gezocht moet worden, of dat ook de valsnelheid van de slibdeeltjes geavanceerder gemodelleerd dient te worden. Een te kleine menging van slib over de waterkolom leidt tot een te langzame verspreiding van slib over het estuarium. Dit kan ook heeft uiteindelijk ook effect op de slibbalans.

3.3 Sedimentatie gebieden: vergelijking met lithografische kaarten.

In paragraaf 3.1 is het sedimentatie gedrag van het slibmodel al even aan de orde geweest. Berekening van de sedimentatie hoeveelheden in de grove SAWES roostervakken was nodig ten einde de slibbalans te kunnen bepalen. De vakken van het SAWES rooster zijn echter bij lange na niet fijn genoeg om geulen en platen te onderscheiden. Sedimentatie op slikken en schorren kan op dit detailniveau al helemaal niet beschreven worden.

Wanneer een gebied een sedimentatie gebied is, zegt dit iets over het lange termijn slibgedrag ter plaatse. Effectief zal elk getij, springtij-doodtij cyclisch of elk seizoen meer sediment blijven liggen dan er opgewerveld wordt. Om dit met een model weer te geven is een berekening nodig waarin het effect van de verschillende seizoenen tot uiting komt.

Idealiter willen we een modelberekening waarin veel ruimtelijke detaillering aanwezig is welke een periode van een jaar bestrijkt. Aan het eerste punt - de ruimtelijke detaillering - kunnen we tegemoet komen door sedimentatie op het oorspronkelijke rooster te berekenen: het SCALDIS400 rooster. Al eerder is aangeduid dat we op dit rooster slechts de variatie binnen het getij met het model bepalen, en de variatie op grotere tijdschaal buiten beschouwing laten. Voor de berekening van de sedimentatie in het model nemen we de modelsetting uit paragraaf 3.2 als uitgangspunt. De berekening gaat over 100 getijden, met initiële massa op de bodem en randconcentraties op zee en aan de rivierzijde van het model. Aan het eind van deze periode wordt de slibdepositie gedurende het getij berekend. De resultaten bij opkomend hoogwater zijn weergegeven in figuur 18.1 en 18.2. Om het getij effect kwijt te raken en de "permanente" sedimentatie weer te kunnen geven, wordt de hoeveelheid slib op de bodem weergegeven bij maximale stroomsnelheid. Deze situatie wordt getoond in figuur 19. Het sediment patroon dat in deze figuur weergegeven wordt, mag als representatief beschouwd worden voor het sedimentatie gedrag van het model.

N.B.: de oplettende lezer zou op kunnen merken dat het sedimentatiepatroon dat op deze wijze verkregen wordt beïnvloed wordt door de initiële massa op de bodem. Een ander methode om de sedimentatie in het model te bepalen is de berekeningen voor de fluviale en mariene slibbalans samen te stellen tot een sedimentatie patroon. Op die manier wordt gegarandeerd dat slib dat

op de bodem terecht komt door sedimentatie daar geraakt is. De slibdepositie is voor een aantal momenten binnen het getij op deze wijze berekend. Het resultaat was nagenoeg identiek aan het voorgaande. Dit toont nogmaals de consistentie van de twee berekeningsmethoden aan. Gezien de extra inspanning die het kost de resultaten van de marien - en fluviale balans berekening te combineren tot één depositie patroon hanteren we de eerste methode.

Ter vergelijking van het modelgedrag met de realiteit hebben we de beschikking over een tweetal lithografische kaarten. De eerste is geconstrueerd op basis van bodemonsters genomen in de periode '73-'78. De tweede op basis van bodemonsters uit '92-'93. Omdat de bodem in het model representatief is voor de situatie rond 1976 gebruiken we de eerstgenoemde lithografische kaart om de modelresultaten mee te vergelijken. Deze kaart wordt getoond in figuur 20. Daar waar op deze kaart het slibpercentage hoog is verwachten we in het model sedimentatie. Niet alle slibrijke gebieden zullen op deze wijze terug te vinden zijn in het model, omdat een deel van deze gebieden lang geleden ontstaan is, onder andere morfologische omstandigheden.

In het model treedt sedimentatie op, op bijna alle grote plaatsystemen in de Westerschelde (zie figuur 21). Op de lithografische kaart is een aantal platen herkenbaar, echter niet alle. De sedimentatie die door het model wordt weergegeven zegt blijkbaar meer iets over sedimentatie in het algemeen dan specifiek iets over slibsedimentatie. Het idee bestaat dat dit te maken heeft met de manier waarop het droogvallen van platen gemodelleerd wordt. Sedimentatie treedt namelijk ook midden op de platen op en aangroei zal op deze wijze niet vanaf de rand gebeuren. Naast enkele slibrijke platen, zijn er in figuur 20 voornamelijk slibrijke gebieden aan de oevervallen van het estuarium aanwezig. Een aantal hiervan komt ook in het model tot uiting, met name het gebied rond de Belgisch-Nederlandse grens, het Schor van Bath, Schor van Waarde, bij het Zuidgors, de Platen van Hulst, de Paulina Schor en langs de oever bij Vlissingen. De slibrijke bodem in het Pas van Terneuzen, in de Honte en in de omgeving van het Middelgat worden niet in het model weergegeven. Het betreft hier in alle drie de gevallen een lokatie in een diep gedeelte van de stroomgeul. Wellicht wordt hier de stroomsnelheid aan de bodem overschat door het model.

3.4 Het ruimtelijk patroon van slib in suspensie: vergelijking met Landsat beelden.

Naast de ruimtelijke verdeling van het slib op de bodem bestaat ook de mogelijkheid het ruimtelijk patroon van het gesuspendeerd slib weer te geven. Als vergelijkingsmateriaal zijn er Landsat opnames voorhanden [Storm et al., 1995]. Deze opnames geven een beeld van de zwevend stof concentratie aan het wateroppervlak. Omdat het model de concentraties aan het wateroppervlak niet goed weergeeft, is besloten de ruimtelijke verdeling van de dieptegemiddelde slibconcentratie te bepalen met het model. Deze is sterk variërende in de tijd. Als illustratie is in figuur 22 de concentratie verdeling bij hoog - en laagwater weergegeven. Het tijdstip van hoog - en laagwater is bepaald in een punt in de omgeving van Hansweert. Opvallend zijn de lage slibconcentraties ter hoogte van Borssele bij hoogwater en rond Vlissingen bij laagwater. Uit de figuur voor de hoogwater situatie komt een duidelijk minimum in concentratie in de omgeving van Terneuzen naar voren. Een sterke toename in concentratie vindt plaats stroom opwaarts van Hansweert. Dit wordt ook signaleerd door in [Van Maldegem, 1993a].

De Landsat opnames tonen synoptisch beelden van het concentratie patroon onder verschillende getij omstandigheden (ook spring-doodtij variatie). Het beeld van 5 oktober 1989 onder gemiddelde getij omstandigheden toont erg veel overeenkomsten met de laagwater opname in figuur 22. De vergelijking

heeft een kwalitatief karakter. De scherpe concentratie stijging stroomopwaarts van Hansweert is aanwezig, evenals de lage concentratie in het gebied rond Vlissingen. Het model geeft echter een verhoogde concentratie tegen de oever bij Breskens. Dit komt niet in de Landsat opname tot uiting. De ebgeul (Gat van Ossensisse en Pas van Terneuzen) heeft een hogere concentratie dan de rest van de omgeving. Kwalitatief gezien geeft het model een redelijke goede weergave van het gemeten zwevend stof beeld voor deze dag.

Jammer genoeg is er geen opname tijdens hoogwaterkentering. Het beeld dat hier het meest bij in de buurt komt is genomen tijdens doottij, op 21 september 1976. Het toont de situatie ruim een uur voor hoogwater. Overeenkomsten met het modelresultaat zijn de lage concentraties ter hoogte van Borssele, de hoge concentraties ter hoogte van de plaat van Baarland en wederom de scherpe concentratie overgang iets stroomafwaarts van Hansweert.

Het is niet mogelijk aan de hand van de Landsat opnames een gedetailleerdere vergelijking uit te voeren. Hiervoor zijn de opnames te weinig discriminerend wat betreft hoge concentraties.

4. Conclusies en aanbevelingen.

In de voorgaande hoofdstukken is beschreven in welke mate het model in staat is de verschillende processen weer te geven. Duidelijk is geworden dat het model sterke kanten heeft, maar ook een aantal zwakkere. Daarnaast wordt er een aantal problemen geïntroduceerd door de methode die gekozen is om de slibbalans voor fluviatiel - en marien slib op te stellen. Met name aan de forse rekentijden en het feit dat geen erosie weergegeven kan worden kleven bezwaren. Hieronder worden de positieve - en negatieve kanten van het model en de gekozen methodiek nog eens op een rijtje gezet.

4.1 Weergave en beperking van de modelprocessen.

Het model is niet in staat het transport van meerdere sedimentfracties tegelijk te bepalen. Om te voorkomen dat het rekenwerk excessieve afmetingen gaat aannemen, is besloten ons te beperken tot één fractie. Deze fractie heeft een gemiddelde deeltjes grootte. Het resultaat van het model zal zo afhangen van de mate waarin deze gemiddelde grootte overeenstemt met de werkelijke deeltjesgrootte op een zekere lokatie. Variaties in deeltjesgrootte over de waterkolom als gevolg van de zwaartekracht (en daarmee samenhangend in concentratie) kunnen evenmin weergegeven worden.

De modelresultaten worden beïnvloed door de wijze waarop het mengingsmechanisme in verticale richting in het model geïmplementeerd is. In paragraaf 2.2.1 is uitgelegd waarom momenteel de menging nog niet snel genoeg plaats kan vinden.

De slib-transportberekeningen worden uitgevoerd met een tijdstap van 15 minuten. Dit limiteert de weergave van de "snelle processen". Fenomenen die zich binnen een tijdstap afspelen (bv. smalle steile pieken) kunnen niet weergegeven worden. Het gebruik van een kleinere tijdstap kan ook het probleem rond de verticale diffusie oplossen. Dit werd tenslotte veroorzaakt door het feit dat in een tijdstap slechts uitwisseling met een aangrenzende modellaag plaats kon vinden.

In sommige gebieden kan de slibconcentratie een waarde bereiken bij welke de valsnelheid van de slibdeeltjes beïnvloed wordt. Het lijkt een goede zaak de formulering voor sedimentatie (hoofdstuk 2 formule (1)) hierop aan te passen. Het model heeft een zeer beperkte hoeveelheid proces formuleringen ter beschikking om de slibdynamiek in het estuarium mee te representeren. Daarnaast bestaat er veel onduidelijkheid omtrent de waarden van de parameters die in de procesformuleringen gebruikt worden. De parameterwaarden zijn veelal gebaseerd op de uitkomsten van een aantal puntmetingen. Hierbij zijn ook weer een aantal aannames gemaakt. Vooral omtrent de ruimtelijke variatie van de parameters is meer kennis van belang. Het verdient de aanbeveling te onderzoeken hoe gevoelig de uitkomsten van een modelberekening zijn voor variaties in de parameterwaarden.

In het model wordt het lange termijn slibtransport berekend op basis van de hydrodynamica van één getij. Het effect van de springtij-doodtij cyclus, de invloed van de rivierafvoer en variaties over seizoenen moeten noodgedwongen buiten beschouwing blijven. Uit metingen is gebleken dat deze variabele omstandigheden een significante invloed op het slibtransport hebben. Het verdient de aanbeveling het effect van genoemde variaties op het modelresultaat in een later stadium alsnog te onderzoeken.

4.2 Evaluatie modelresultaten.

In hoofdstuk 3 zijn de modelresultaten op verschillende vlakken vergeleken met de werkelijkheid. De voornaamste bevindingen worden nogmaals opgesomd:

Balans berekening.

- Zowel de aanvoer van fluviatiel slib als de import van marien slib naar de Westerschelde worden goed door het model weergegeven.
- De transporten van fluviatiel - en marien slib over de Belgisch-Nederlandse grens worden zeer realistisch weergegeven.
- Stroomopwaarts van Lillo (grens SAWES vakken 4-5) is nauwelijks marien slib terug te vinden. Dit is in overeenstemming met [Van Maldegem, 1993a].
- Het fluviatiel slib wordt slechts in zeer geringe mate stroomafwaarts van Hansweert getransporteerd. Een verklaring kan wellicht in de hydrodynamische omstandigheden gevonden worden.
- De methode aan de hand waarvan de balans bepaald wordt laat niet toe dat erosie plaatsvindt. Hiervoor dient de balans gecorrigeerd te worden.
- Het concentratie verloop over het getij komt zeer goed overeen met de werkelijkheid in SAWES vakken 3-9. In de ander vakken treden er (grote) afwijkingen op.

Getij verloop en concentratie profielen.

- De resultaten van de beide berekeningswijzen zijn onderling goed vergelijkbaar.
- De slib concentraties in de hogere delen van de waterkolom wijken sterk af van de gemeten waarden door het te trage verticale diffusie mechanisme.
- Voor elke meetperiode zijn er zowel lokaties te vinden met goede modelresultaten als lokaties waarin grote afwijkingen ten opzichte van de meetdata optreden. De lokaties met grote overeenkomsten met de metingen zijn grotendeels in de stroomgeul gelegen. De grillige bodemtopografie speelt een belangrijke factor in de mate van overeenkomst tussen model en meting.
- Concentratie profielen vertonen weinig overeenkomst met de werkelijkheid.
- Het model geeft de sedimentatie van slikken aan de oevers van de Westerschelde redelijk weer. Sedimentatie van hoger gelegen schorren wordt niet weergegeven vanwege het feit dat deze gebieden slechts bij springtij onderwater lopen. De slibrijke gebieden in de geulen komen niet in het modelresultaat naar voren. Onderzocht zal worden of de hydrodynamica ter plaatse correct berekend is.
- De patronen die in de Landsat opnames van zwevend stof aanwezig zijn komen redelijk goed in het modelresultaat naar voren. Meest opvallende kenmerk is de scherpe concentratiegradiënt in de omgeving van Hansweert.

Concluderend kan het model een goed hulpmiddel genoemd worden voor scenario studies die de slibhuishouding aangaan. Te noemen zijn de slibverwijdering in de Beneden Zeeschelde en de verdieping van de Westerschelde, waarvan al sprake is geweest in de inleiding. Op een aantal terreinen kan het model echter nog verbeterd worden. De voornaamste aanbevelingen zijn genoemd in paragraaf 4.1. Mits met verstand gebruikt, kan het model in de huidige vorm al toegepast worden.

Literatuurlijst.

L. Cancino en R. Neves, 3D-numerical modelling of cohesive suspended sediment in the Western Scheldt Estuary (The Netherlands), Netherlands Journal of Aquatic Ecology, 28 (3-4), p. 337-345, (1994).

J. Dronkers, J.F.T. Zimmerman, Some principles of mixing in tidal lagoons, Oceanologica Acta SP, p. 107-117, (1982).

J.M. de Kok, Numerical modelling of transport processes in coastal waters, Ph.D. Thesis University of Utrecht / Rijkswaterstaat RIKZ, (1994).

H. Hilberink, B. de Jong en A. Langerak, Het normeren van slibgegevens in de Westerschelde en het uitvoeren van een trendanalyse over de periode 1970-1990 op basis van de genormeerde slibgegevens, Rijkswaterstaat RIKZ, RKZ-215, (1996).

D.C. van Maldegem, De slibbalans van het Schelde-estuarium, Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, Nota GWA0-91.081, (1993a).

D.C. van Maldegem, H.P.J. Mulder en A. Langerak, A cohesive sediment balance for the Scheldt Estuary, Netherlands Journal of Aquatic Ecology 27 (2-4), p. 247-256, (1993b).

Meetrapport, Meetresultaten stroom - en sedimentmeting Nauw van Bath / Schaar van de Noord Raal 2 (4 april 1989), Directie Zeeland / Meetdienst Zeeland, Notitie ZLMD-89.N.063, (1989a).

Meetrapport, Meetresultaten stroom - en sedimentmeting Nauw van Bath / Schaar van de Noord (SAVES 8, 12 april 1989), Directie Zeeland / Meetdienst Zeeland, Notitie ZLMD-89.N.122, (1989b).

H.P.J. Mulder en C. Udink, Modelling of cohesive sediment transport; A case study: the Western Scheldt estuary, In: B.L. Edge, Ed., 22nd Coastal Engin. Conf. Proc. Internat. Conf. Delft, The Netherlands, p. 3012-3023, (1991).

H.P.J. Mulder, Analyse 13-uurs verticaalmetingen in de Westerschelde t.b.v. slibtransportmodellering, Rijkswaterstaat RIKZ, werkdocument RIKZ/OS-95.615X, (1995).

L.I. Portela en R. Neves, Numerical Modelling of Suspended Sediment Transport in Tidal Estuaries: A Comparison between the Tagus (Portugal) and the Scheldt (Belgium-The Netherlands), Netherlands Journal of Aquatic Ecology, 28 (3-4), p. 329-335, (1994).

I.D.M. Rozendaal, Ontwerpbeschrijving en gebruikershandleiding van de SLIB3D module, Rijkswaterstaat RIKZ / SIMTECH BV, (1995).

R.M. Salden en Z. Yang, A three dimensional hydrodynamic model of the Scheldt estuary for the transport of fine sediment, Rijkswaterstaat RIKZ, werkdocument RIKZ/OS-96.143X, (1996).

R.M. Salden, J.M. de Kok, I.D.M. Rozendaal en G. Bultman, Lagrangiaanse transportpaden in de kuststrook ten behoeve van slibtransport, Rijkswaterstaat RIKZ, werkdocument RIKZ/OS-94.155X, (1994).

C. Storm, D.C. van Maldegem, H.J. Den Hollander, J.M.M. Kokke, LANDSAT atlas Schelde-estuarium, Een selectie van satellietbeelden vanaf de Voordelta tot aan Antwerpen, Rijkswaterstaat RIKZ / MD, Werkdocument RIKZ/OS-95.802X, (1995).

E. Taveniers, Beneden-Zeeschelde, slibbalans 1994, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Maritieme Schelde, verslag AMS.95/02, (1995).

E. Taveniers, Beneden-Zeeschelde, slibbalans 1995, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Maritieme Schelde, verslag AMS-96.03, (1996).

S.J.P. Vereeke, Geactualiseerde slibbalans Schelde-estuarium, Rijkswaterstaat Directie Zeeland, Nota AX 94.064, (1994).

Lijst van figuren.

- Figuur 0** Overzicht van de havendokken en sluiscomplexen in de omgeving van Antwerpen.
- Figuur 1** Het rooster van het SCALDIS400 model.
- Figuur 2** De ligging van de bodem in verschillende delen van het modelrooster. Tevens is de lokatie van de meetpunten aangegeven.
- Figuur 3.1** Het verloop van de waterstand bij Bath gedurende een springtij-doodtij cyclus.
- Figuur 3.2** Het verloop van de waterstand gedurende het getij voor de verschillende meetlokaties.
- Figuur 4.1** De ligging van de meetschepen op 4 april 1989.
- Figuur 4.2** De ligging van de meetschepen op 6 april 1989.
- Figuur 4.3** De ligging van de meetschepen op 10 april 1989.
- Figuur 4.4** De ligging van de meetschepen op 12 april 1989.
- Figuur 5** Het rooster van het SAWES model.
- Figuur 6** Aggregatie van het SCALDIS400 rooster naar het SAWES rooster.
- Figuur 7** De slibbalans van het Schelde estuarium in Megaton per jaar naar [Van Maldegem, 1993a].
- Figuur 8** De slibbalans van het Schelde estuarium in Megaton per jaar bepaald met het model.
- Figuur 9.1** De slibbalans in Megaton per jaar bepaald met het model na schaling.
- Figuur 9.2** De slibbalans in Megaton per jaar bepaald met het model na schaling en correctie.
- Figuur 10** Het reststroomp patroon aan het wateroppervlak en aan de bodem in het oostelijk deel van de Westerschelde.
- Figuur 11.1** Slibmassa verloop (in kg) over het getij voor de SAWES vakken. Aparte berekening voor fluviatiel - en marien slib ten behoeve van de balansbepaling.
- Figuur 11.2** Slibmassa (in kg) en concentratie (in mg/l) verloop voor de SAWES vakken. Resultaat van de balansberekeningen voor fluviatiel - en marien slib achteraf opgeteld.
- Figuur 12** Slibmassa (in kg) en concentratie (in mg/l) verloop over het getij voor de berekening met initiële slibmassa.

- Figuur 13.1** Concentratie verloop (in mg/l) op 4 april 1989 in meetpunt 3 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 13.2** Concentratie verloop (in mg/l) op 4 april 1989 in meetpunt 4 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 13.3** Concentratie verloop (in mg/l) op 4 april 1989 in meetpunt 8 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 13.4** Concentratie verloop (in mg/l) op 4 april 1989 in meetpunt 6 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 14.1** Concentratie verloop (in mg/l) op 6 april 1989 in meetpunt 5 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 14.2** Concentratie verloop (in mg/l) op 6 april 1989 in meetpunt 11 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 14.3** Concentratie verloop (in mg/l) op 6 april 1989 in meetpunt 2 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 14.4** Concentratie verloop (in mg/l) op 6 april 1989 in meetpunt 8 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 15.1** Concentratie verloop (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 2 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 15.2** Concentratie verloop (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 6 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 15.3** Concentratie verloop (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 3 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 15.4** Concentratie verloop (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 9 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 15.5** Concentratie verloop (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 7 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 16.1** Concentratie verloop (in mg/l) op 12 april 1989 in meetpunt 6 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 16.2** Concentratie verloop (in mg/l) op 12 april 1989 in meetpunt 8 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).
- Figuur 17.1** Concentratie profielen (in mg/l) op 4 april 1989 in meetpunt 3: meting. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.
- Figuur 17.2** Concentratie profielen (in g/l) op 4 april 1989 in meetpunt 3: model. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.
- Figuur 17.3** Concentratie profielen (in mg/l) op 6 april 1989 in meetpunt 5: meting. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.
- Figuur 17.4** Concentratie profielen (in g/l) op 6 april 1989 in meetpunt 5: model. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.
- Figuur 17.5** Concentratie profielen (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 2: meting. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.

Figuur 17.6 Concentratie profielen (in g/l) op 10 april 1989 in meetpunt 2: model. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.

Figuur 17.7 Concentratie profielen (in mg/l) op 12 april 1989 in meetpunt 6: meting. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.

Figuur 17.8 Concentratie profielen (in g/l) op 12 april 1989 in meetpunt 6: model. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.

Figuur 18.1 Verloop depositie: opkomend hoogwater. Opnames elk half uur.

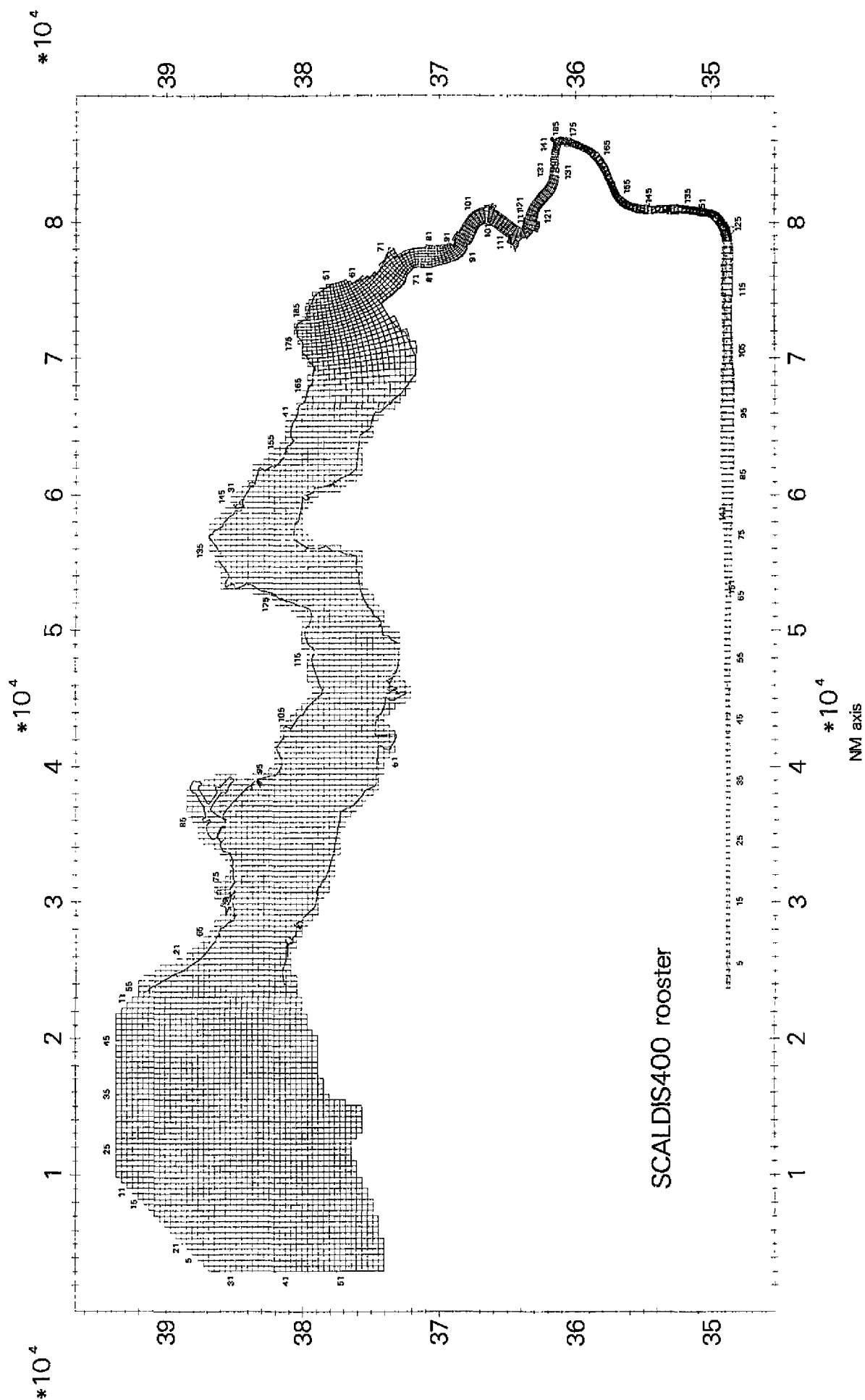
Figuur 18.2 Vervolg verloop van depositie: afnemend hoogwater.

Figuur 19 Slibsedimentatie berekend met het model.

Figuur 20 Slibpercentage in de bodem van de Westerschelde.

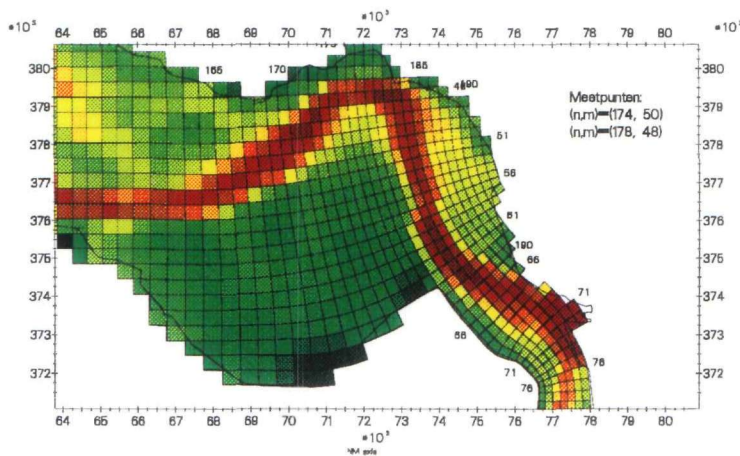
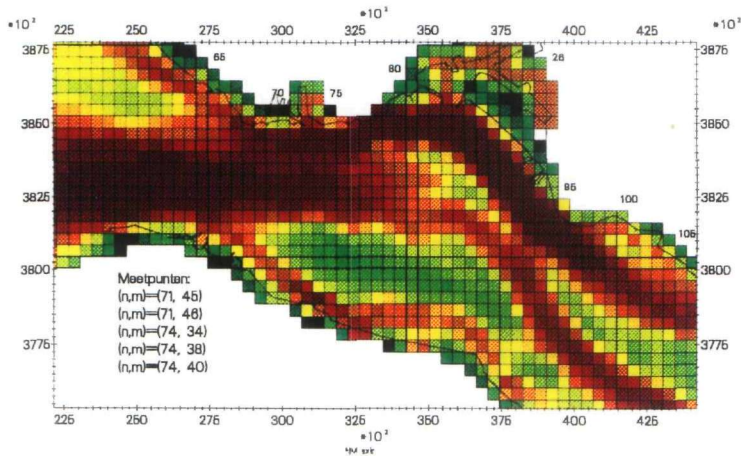
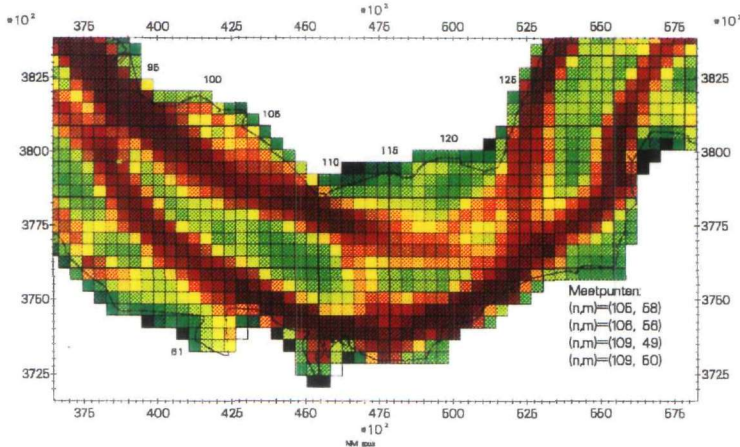
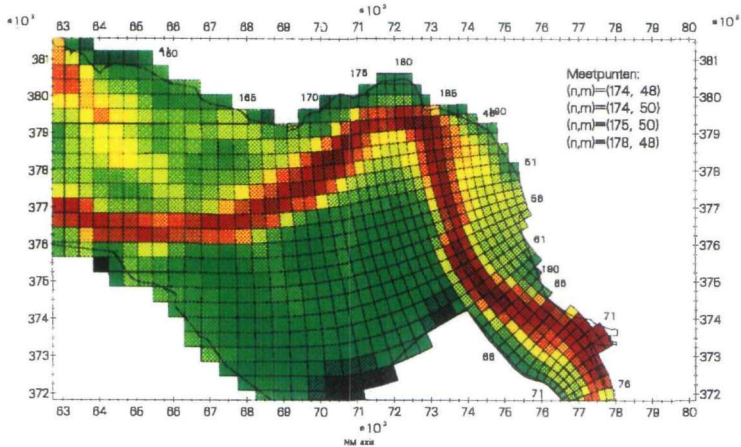
Figuur 21 Overzicht van de geul - en plaatsystemen in de Westerschelde.

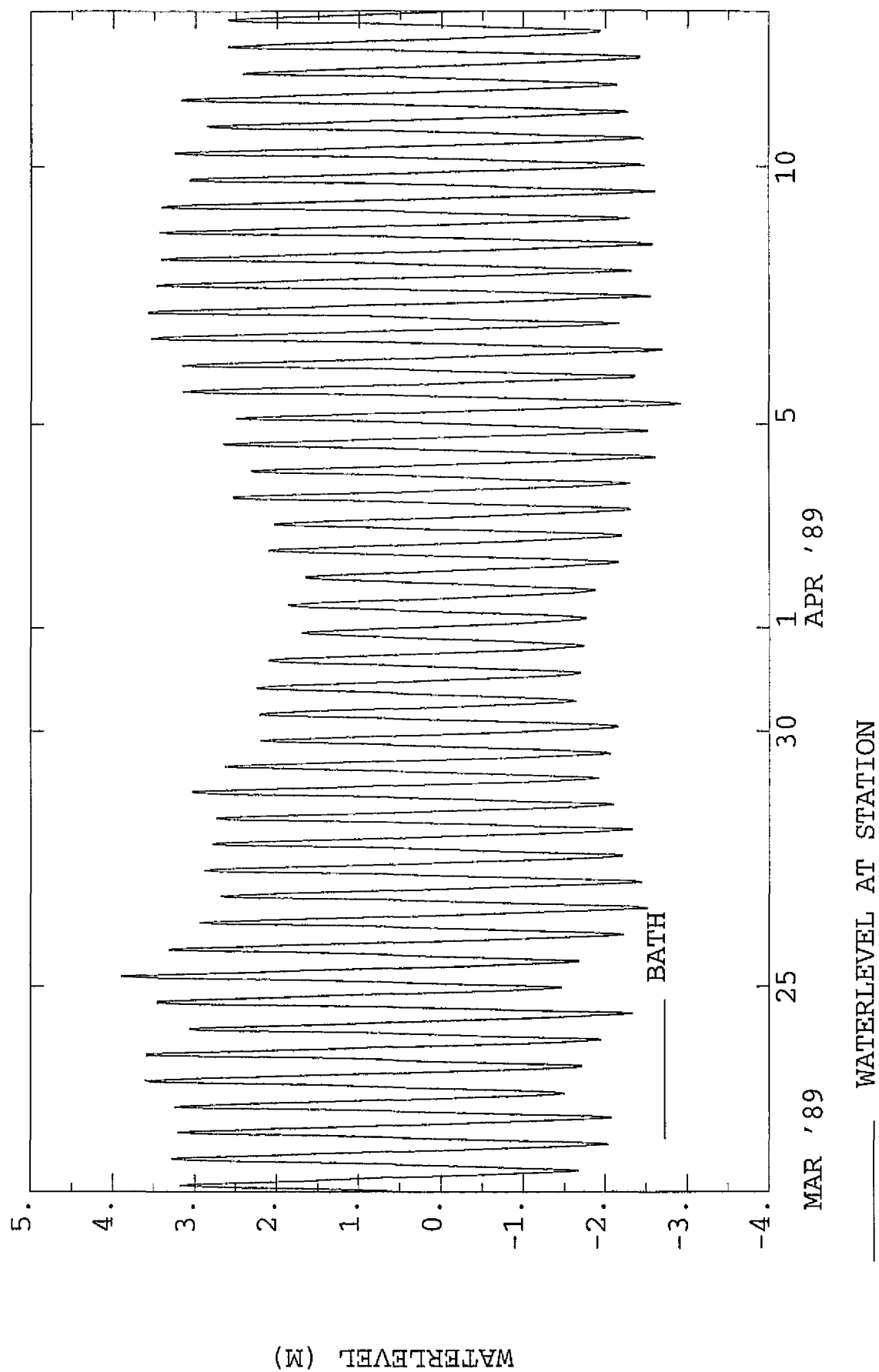
Figuur 22 Slibconcentratie (in g/l) bij hoogwater (boven) en laagwater (onder).



Figuur 1 Het rooster van het SCALDIS400 model.

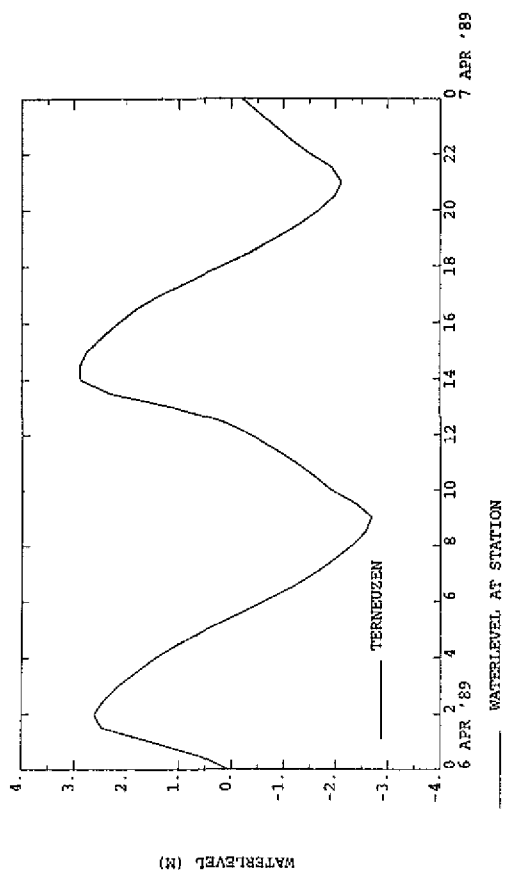
Figuur 2 De ligging van de bodem in verschillende delen van het model-rooster. Tevens is de lokatie van de meetpunten aangegeven.



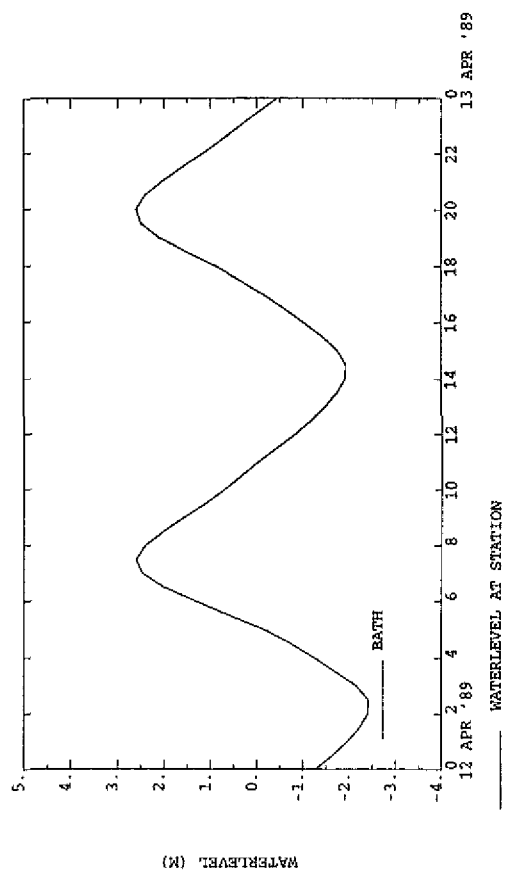


Figuur 3.1 Het verloop van de waterstand bij Bath gedurende een springtij-doodtij cyclus.

Scaldis400 model

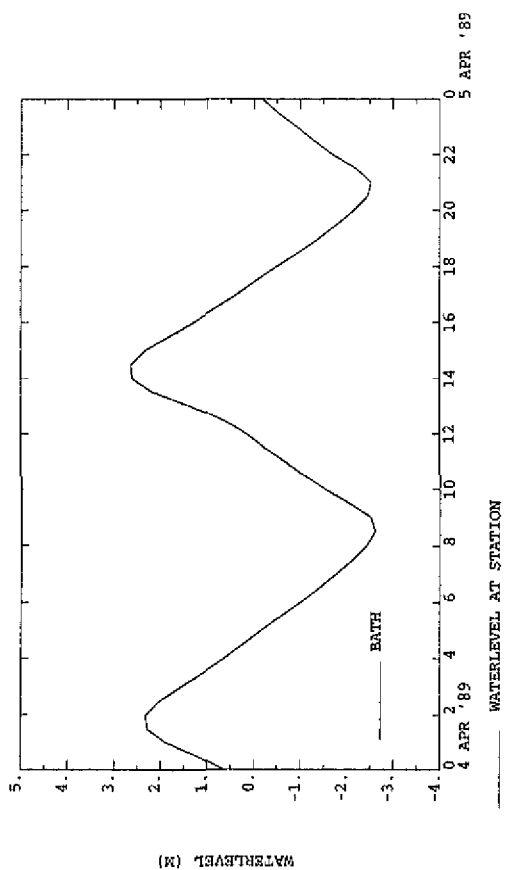


Scaldis400 model

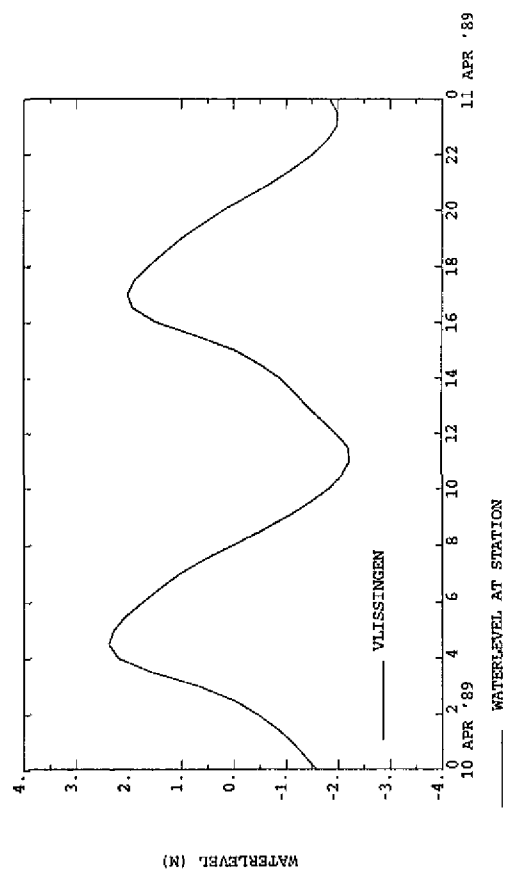


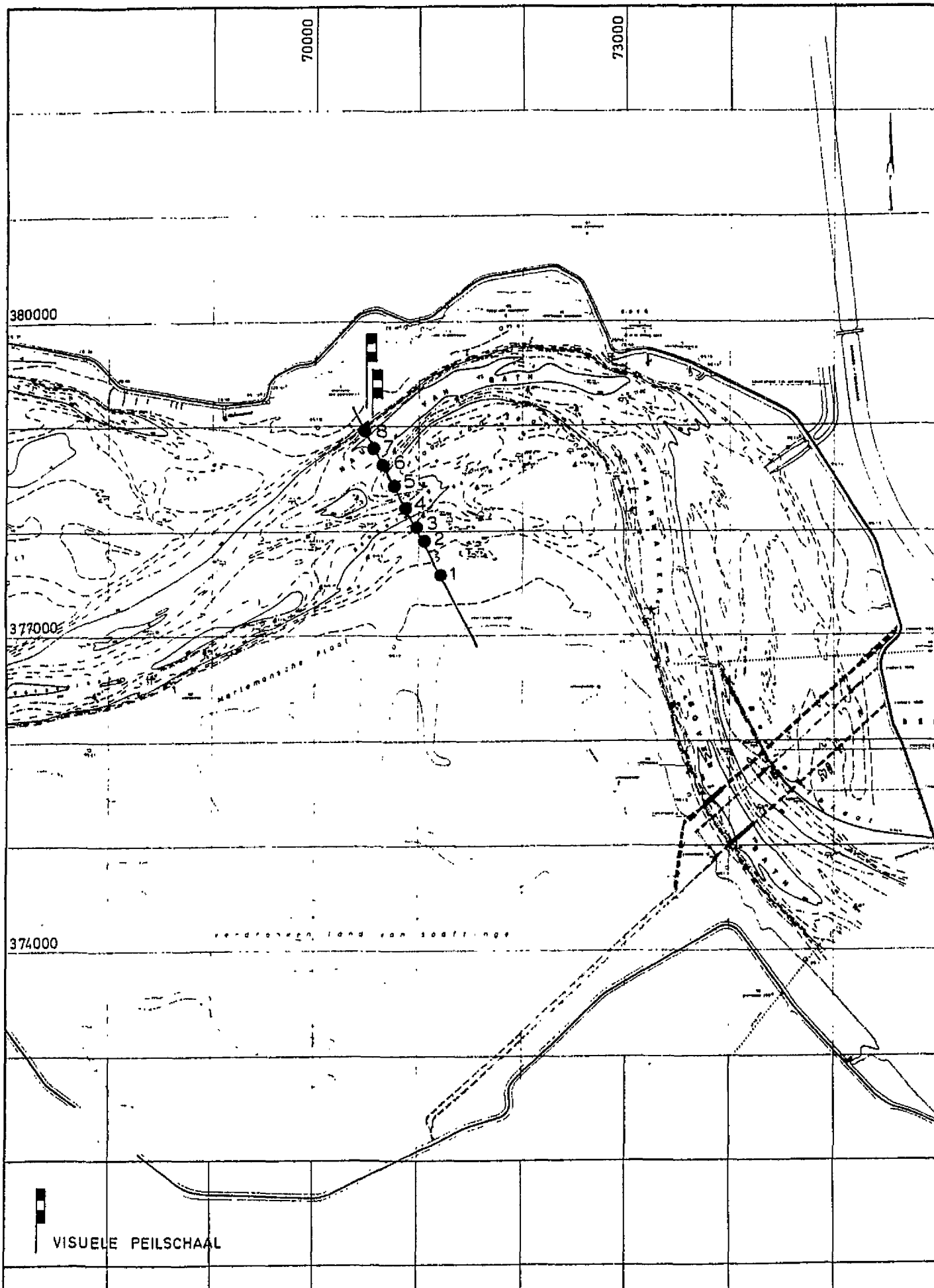
Figuur 3.2 Het verloop van de waterstand gedurende het getij voor de verschillende meetlokaties.

Scaldis400 model



Scaldis400 model

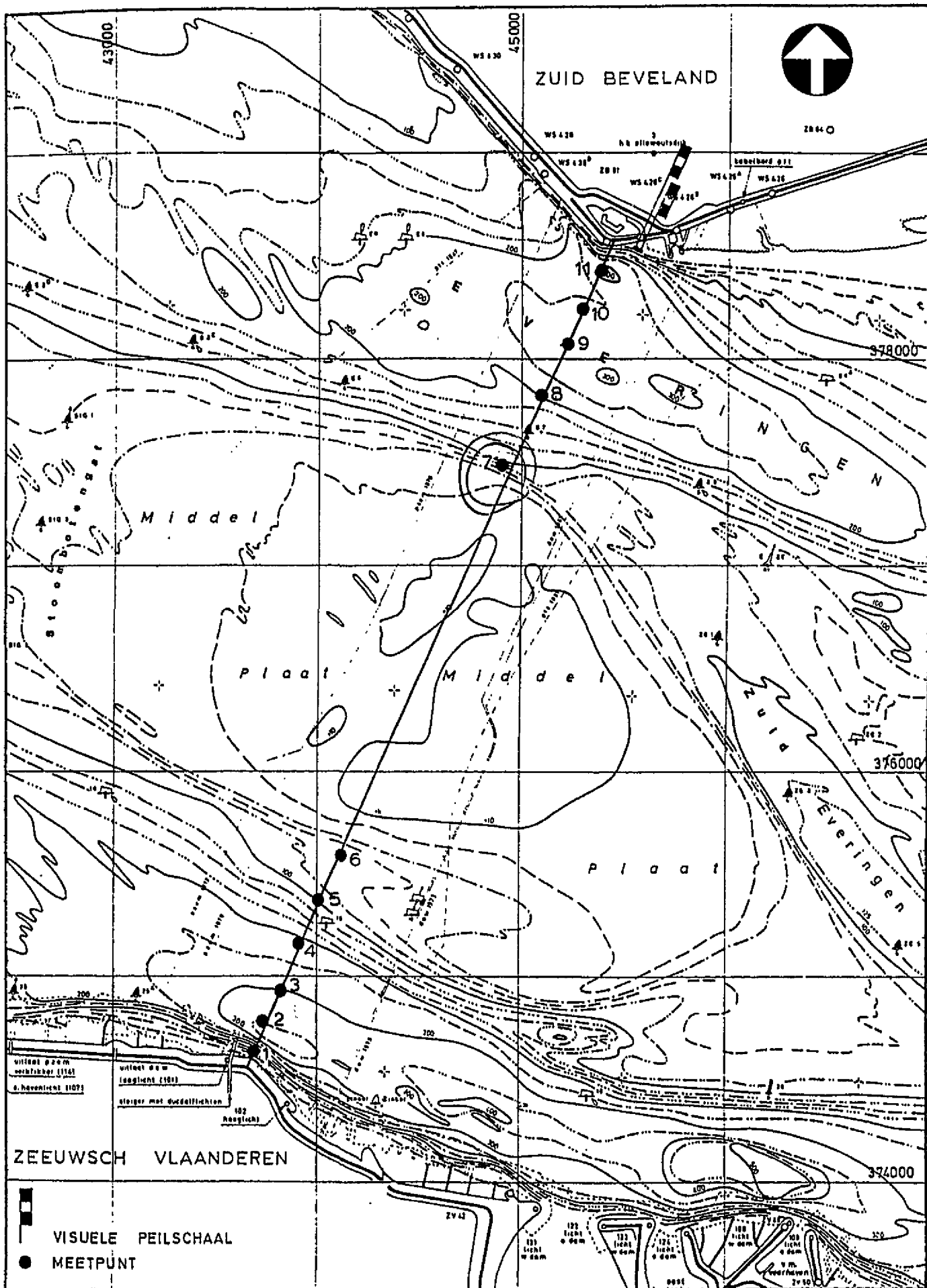




rijkswaterstaat
directie zeeland - meetdienst

get.		bijl. 1
gec.		code 0108 M 8901
gez.		schaal 1: 50000
akk.		nr.

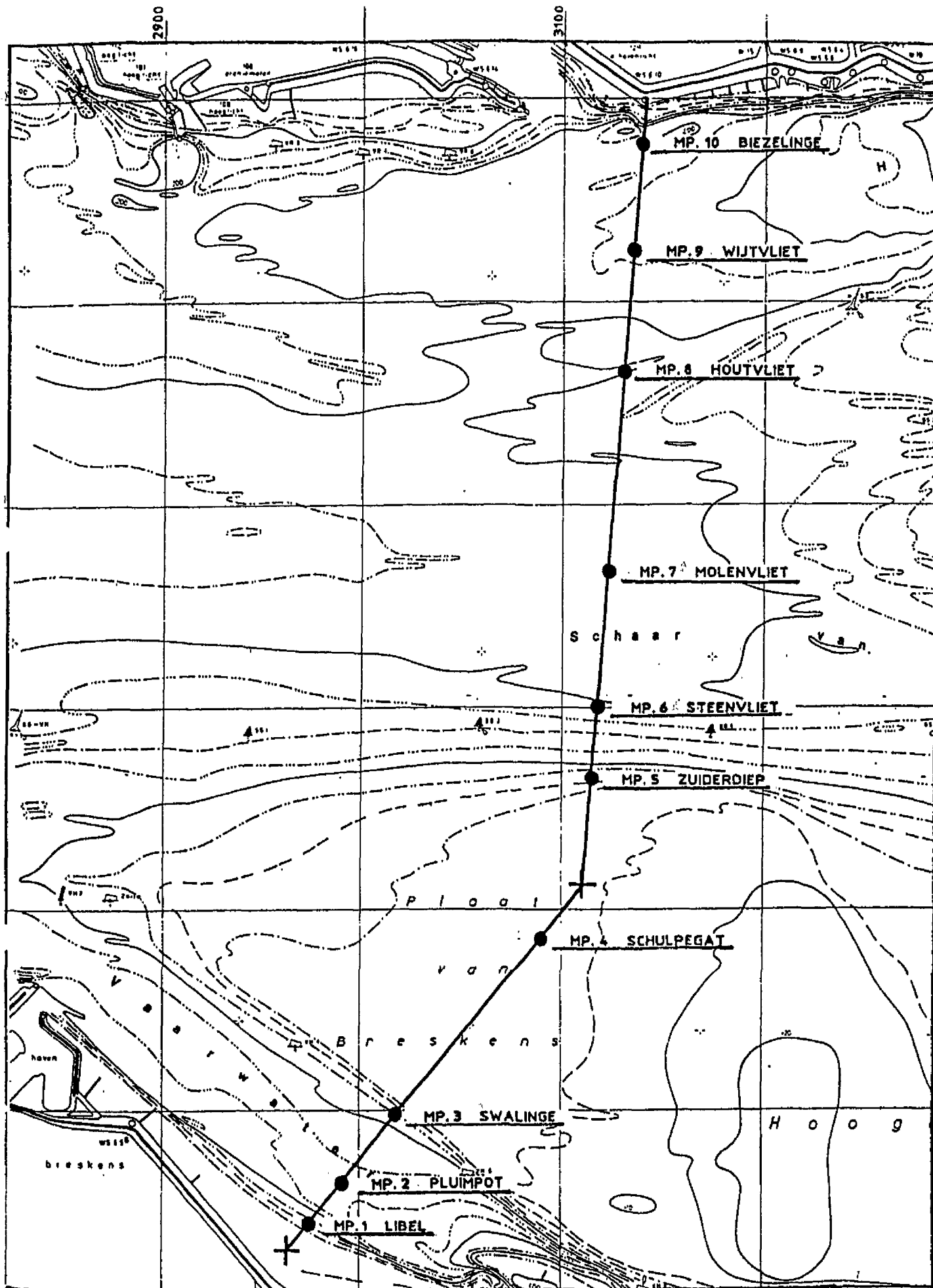
Figuur 4.1 De ligging van de meetschepen op 4 april 1989.



rijkswaterstaat
directie zeeland - meetdienst

get.		bijl. 1
gec.	code	0425 M 8901
gez.	schaal	1: 25000
akk.	nr.	

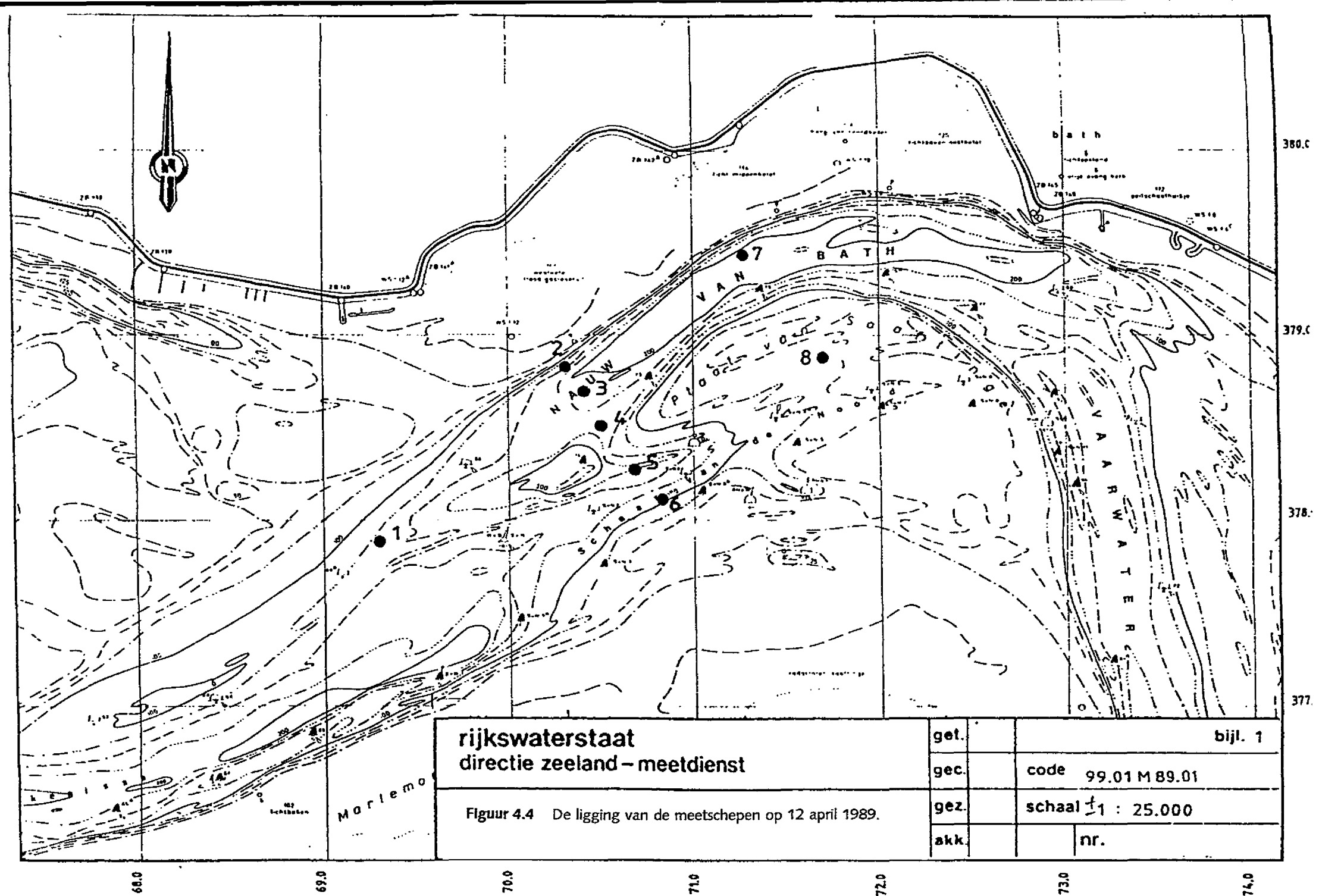
Figuur 4.2 De ligging van de meetschepen op 6 april 1989.



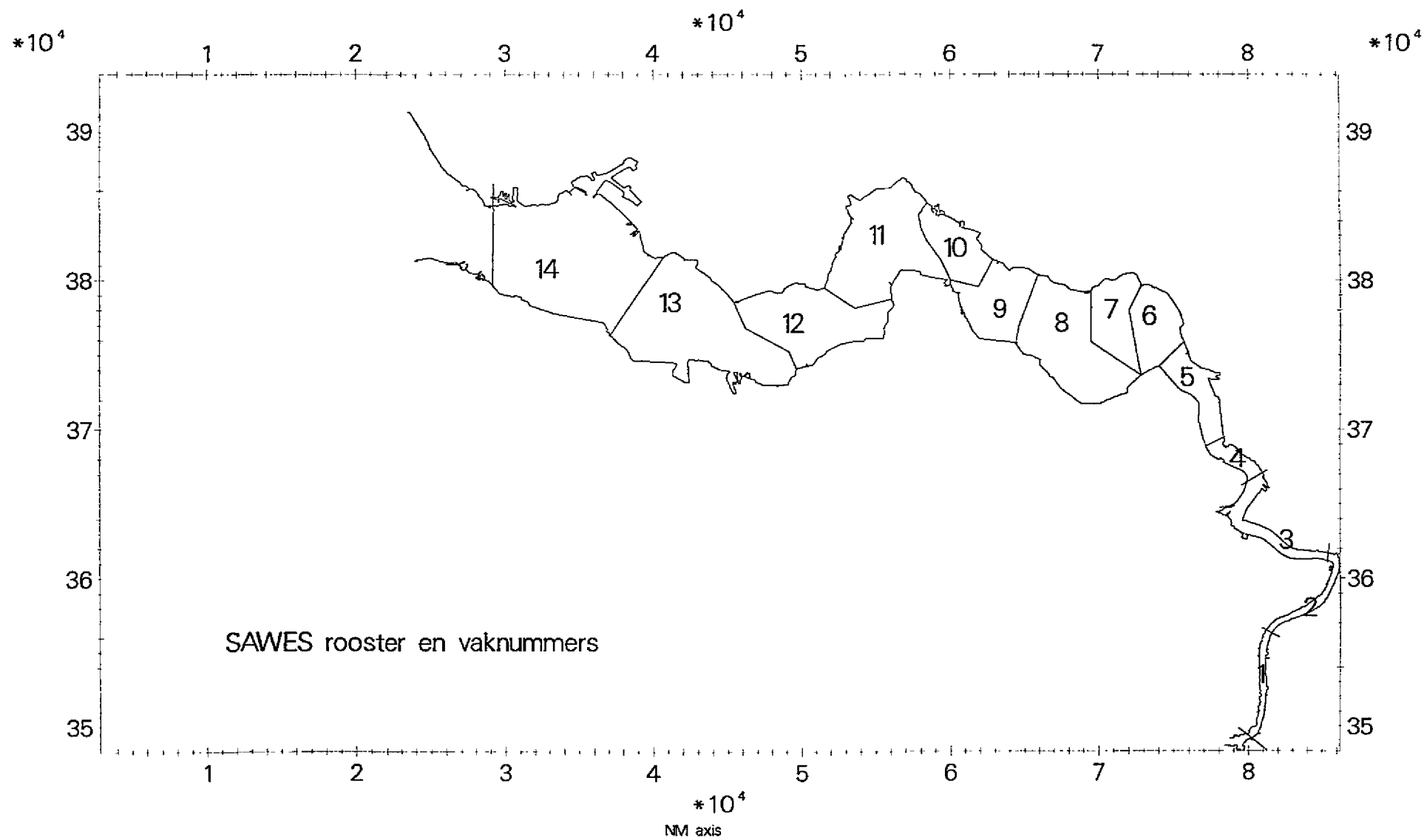
rijkswaterstaat
directie zeeland - meetdienst

Figuur 4.3 De ligging van de meetschepen op 10 april 1989.

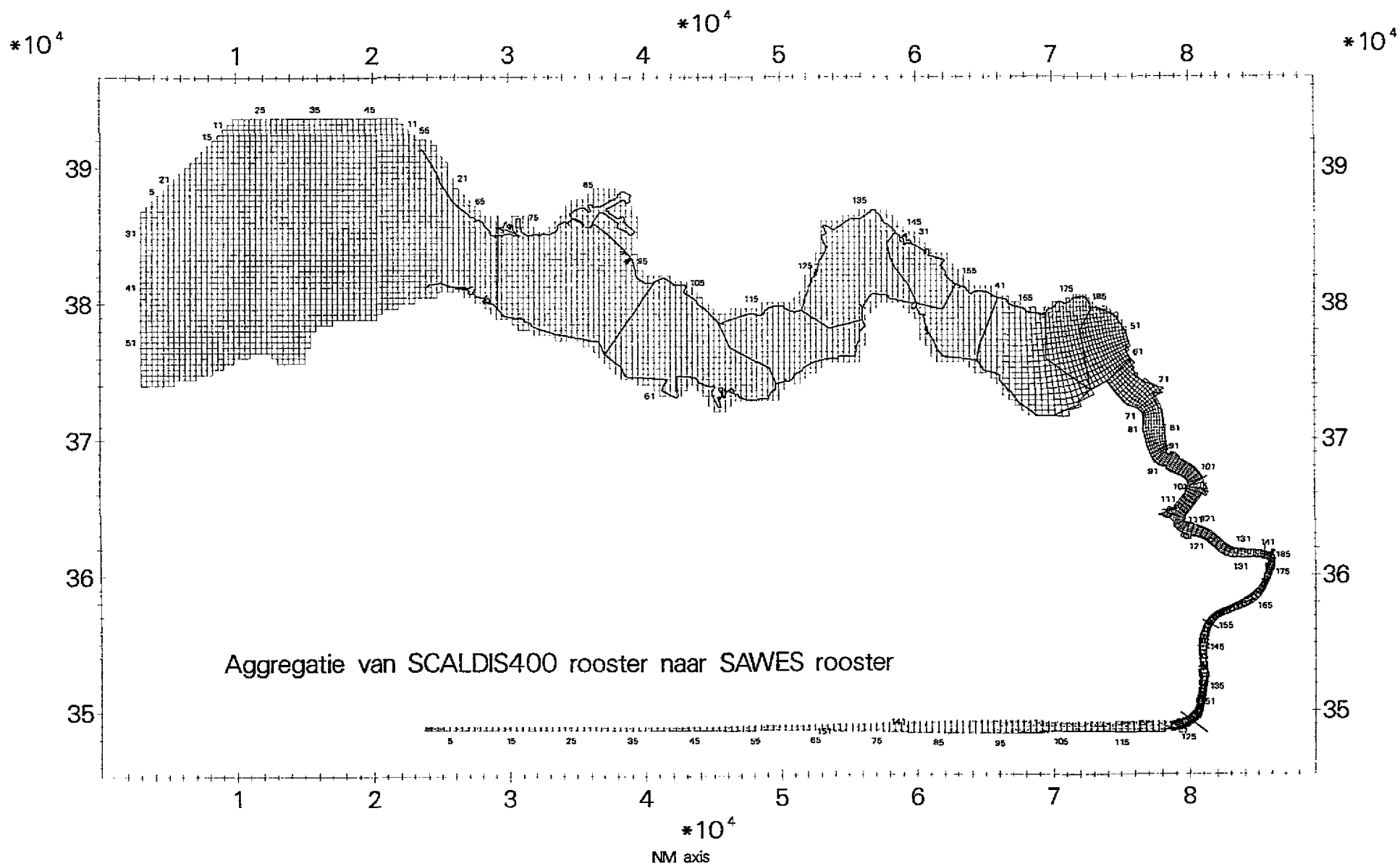
get.		bijl. 1
gec.	code	06.11 M 89.01
gez.	schaal	1:25.000
akk.	nr.	

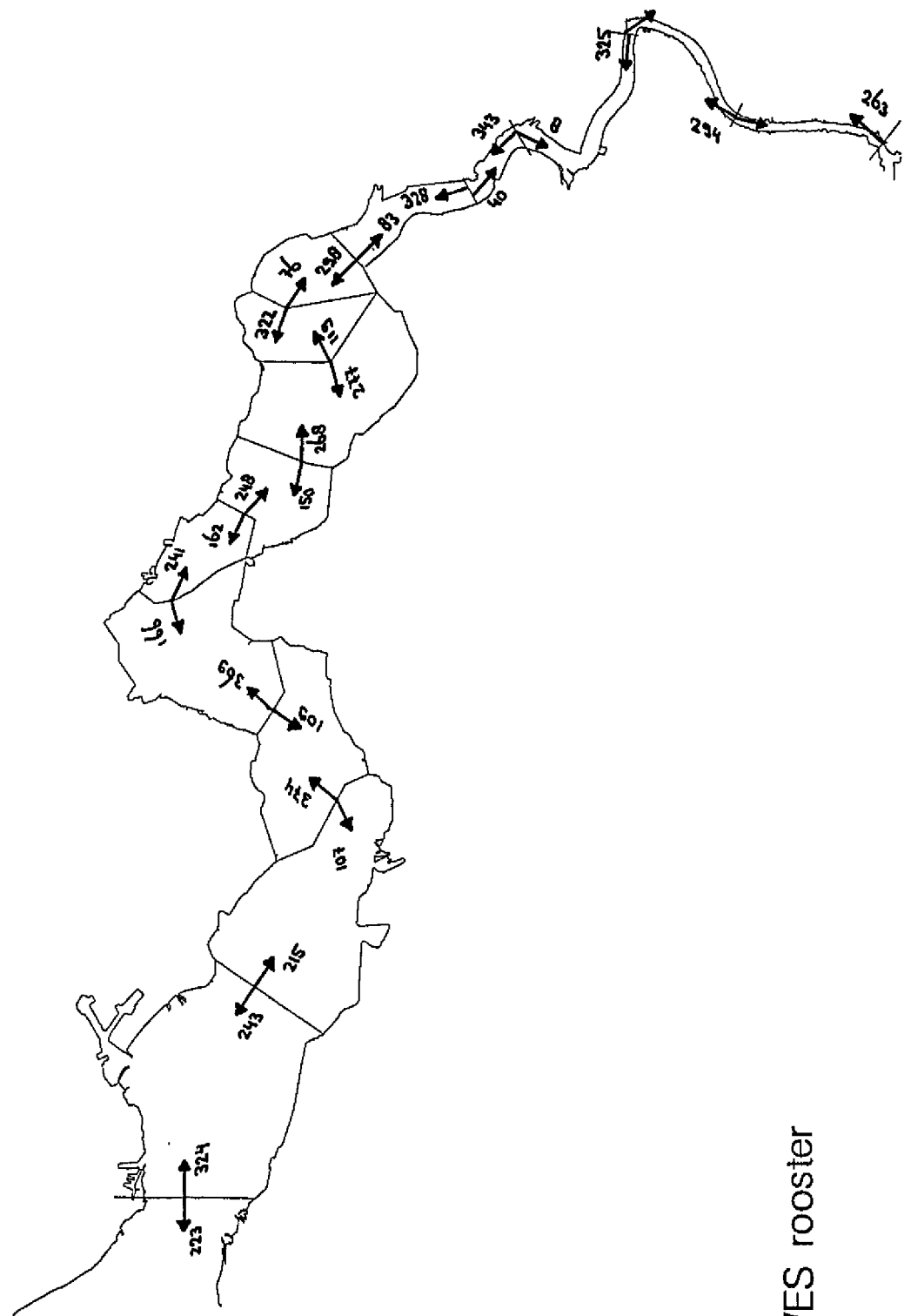


Figuur 5 Het rooster van het SAWES model.



Figuur 6 Aggregatie van het SCALDIS400 rooster naar het SAWES rooster.

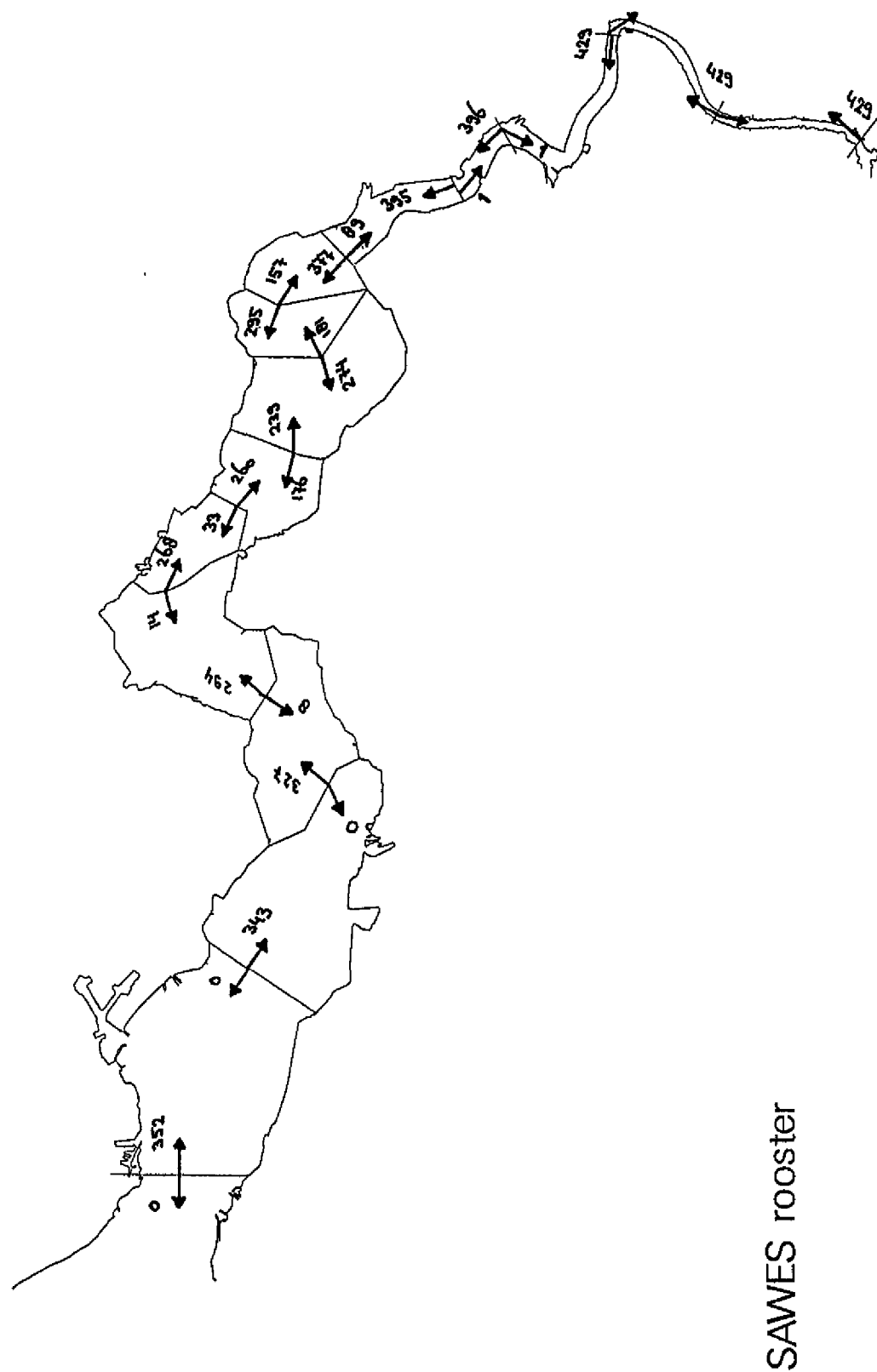




SAVES rooster

Figuur 7

De slibbalans van het Schelde estuarium in Megaton per jaar naar [Van Maldegem, 1993a].

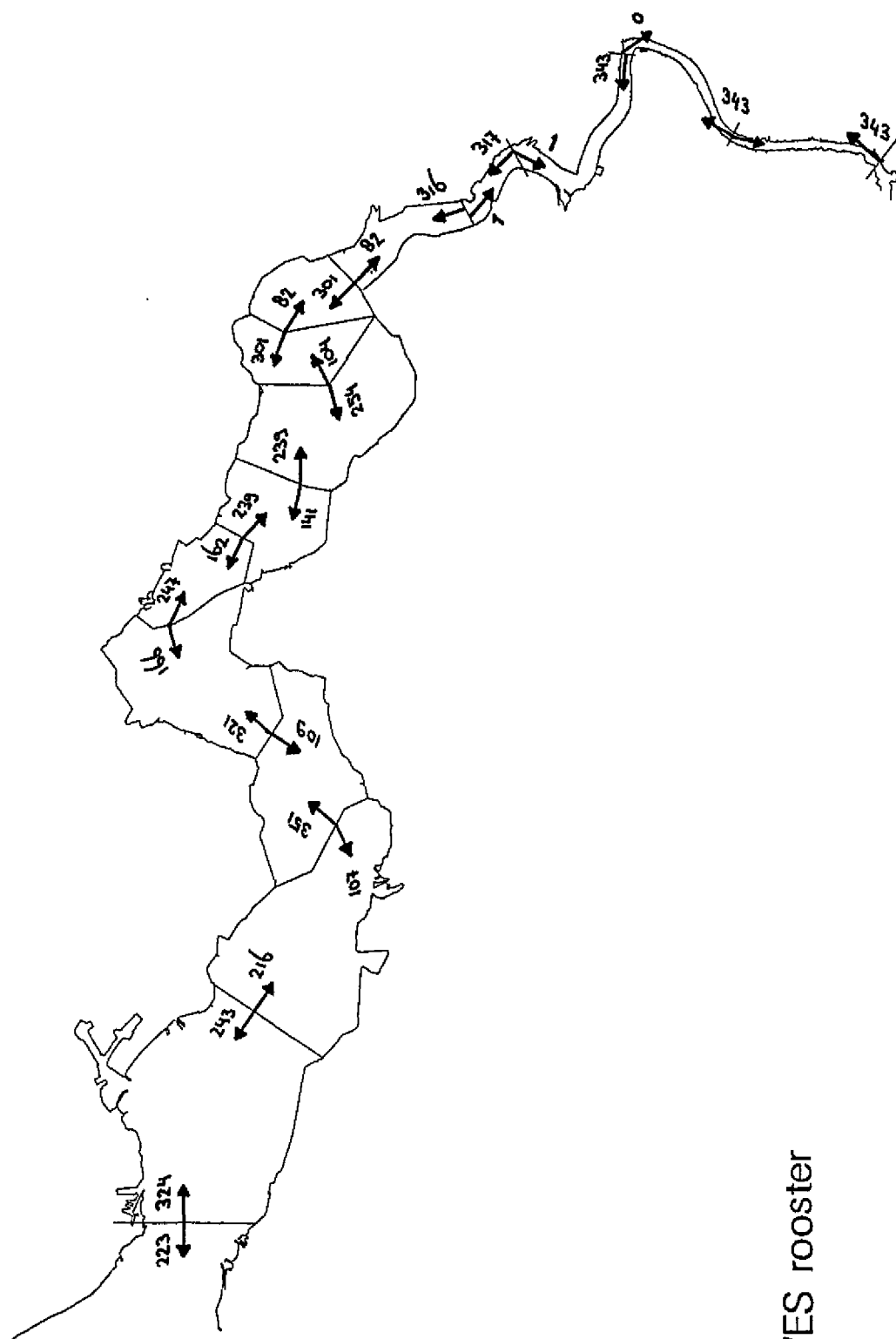


Figuur 8 De slibbalans van het Schelde estuarium in Megaton per jaar bepaald met het model.



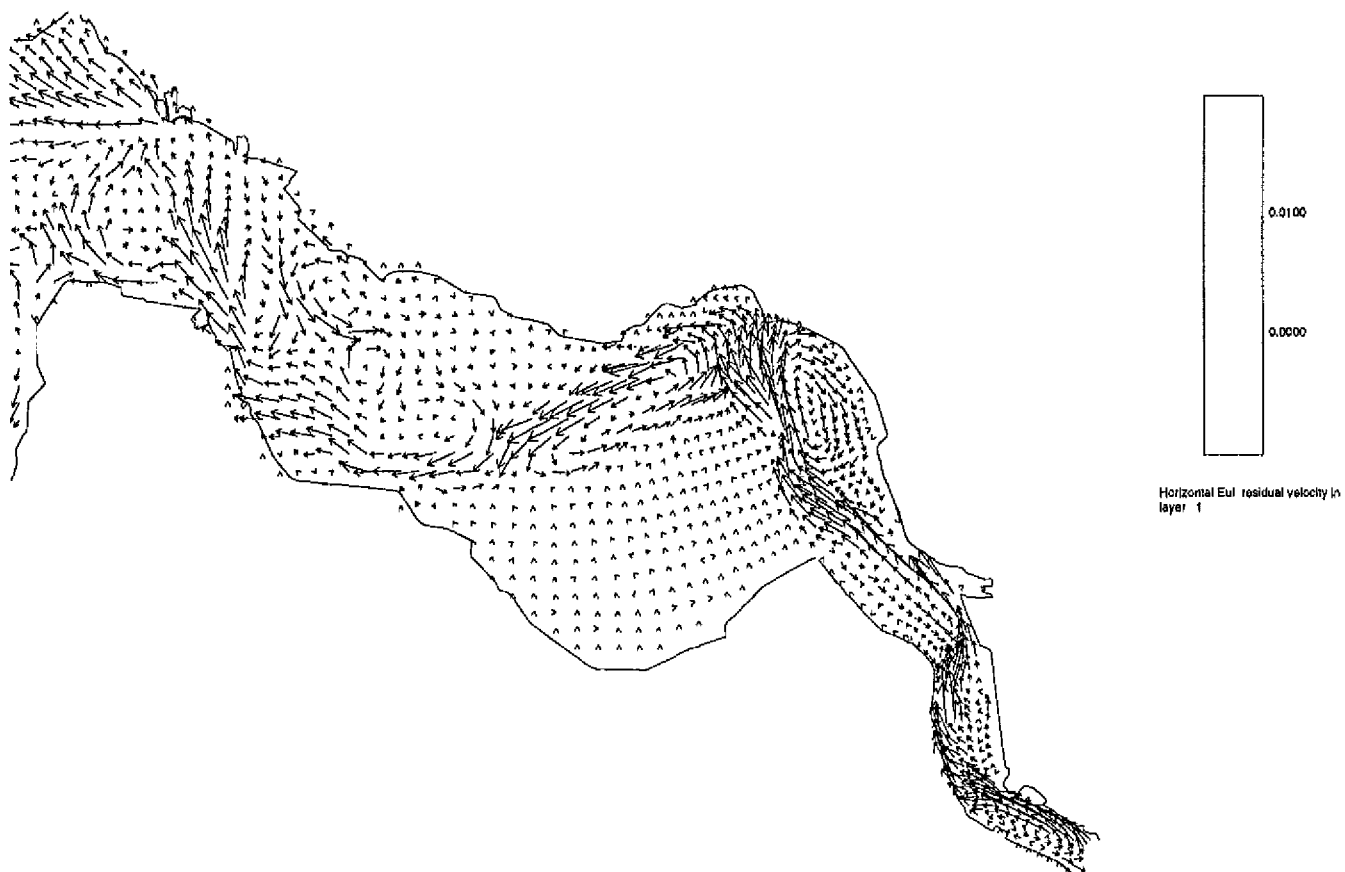
SAWES rooster

Figuur 9.1 De slibbalans in Megaton per jaar bepaald met het model na schaling.

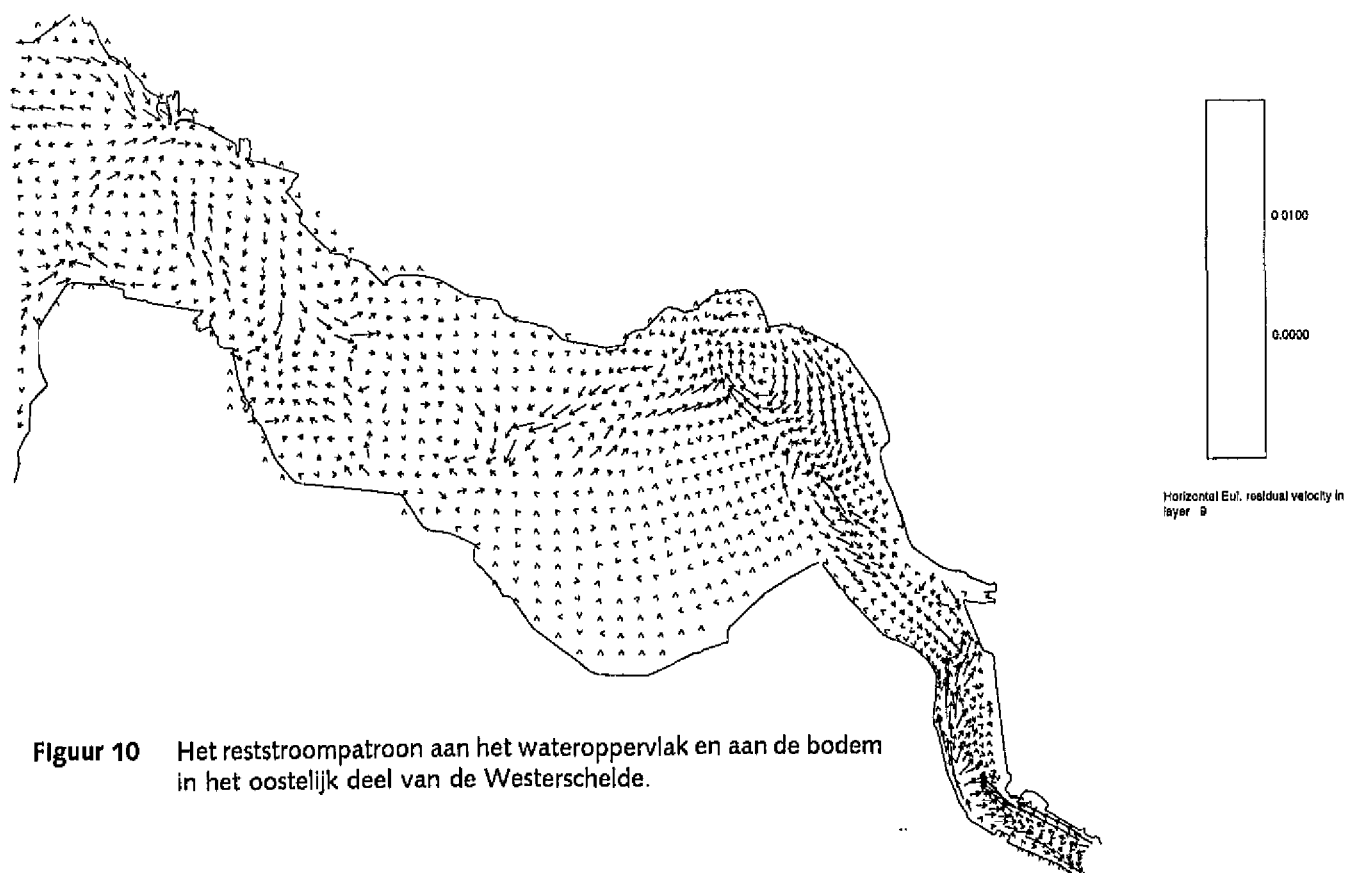


SAWES rooster

Figuur 9.2 De slibbalans in Megaton per jaar bepaald met het model na schaling en correctie.

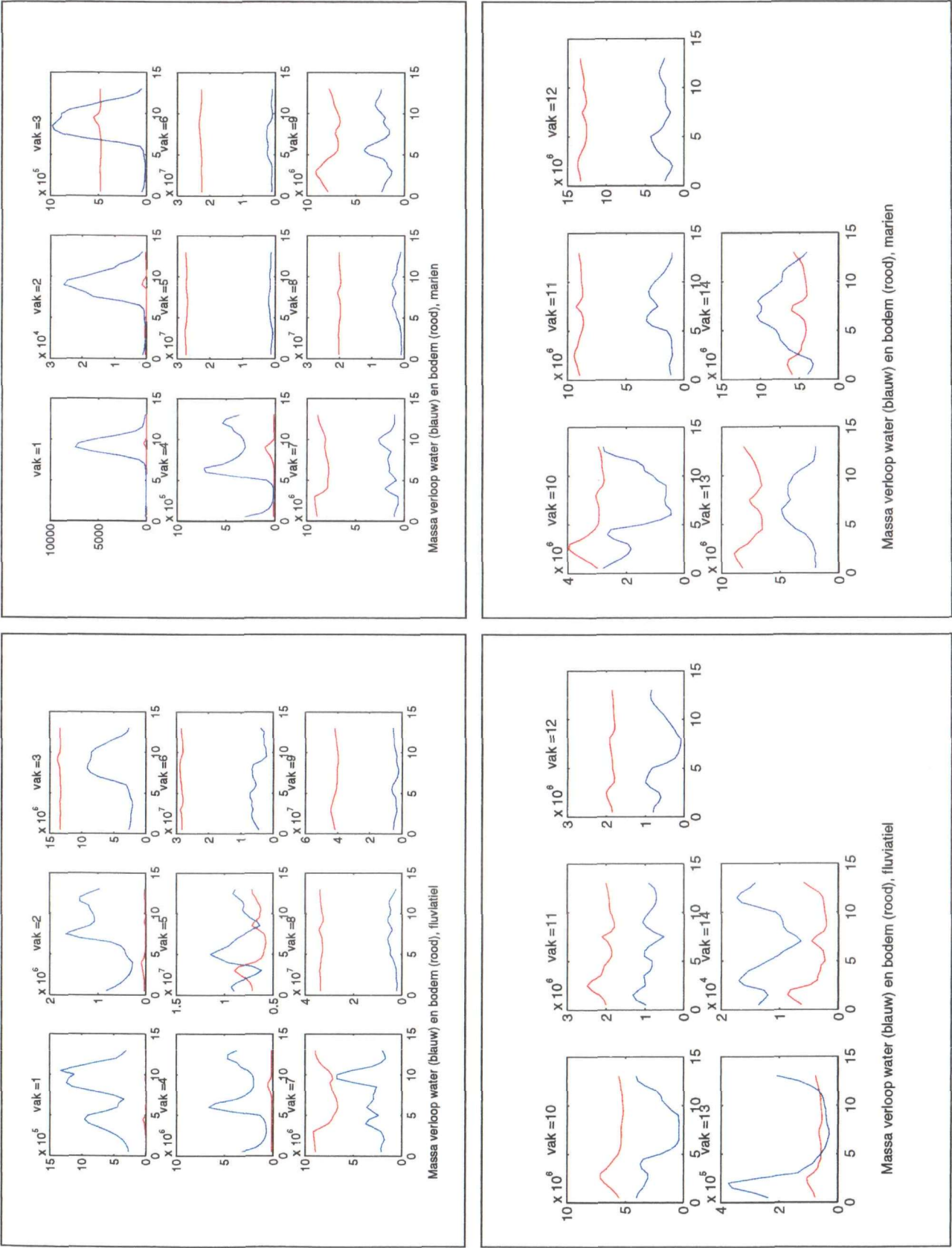


model : Scale400 model, Horizontal Euler residual velocity in layer 1, datum : 890412, tijd : 2000

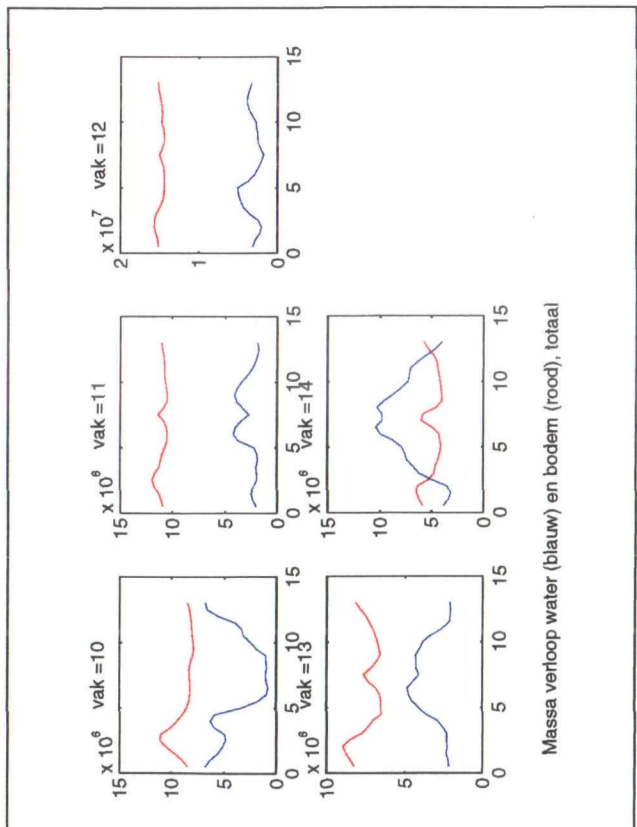
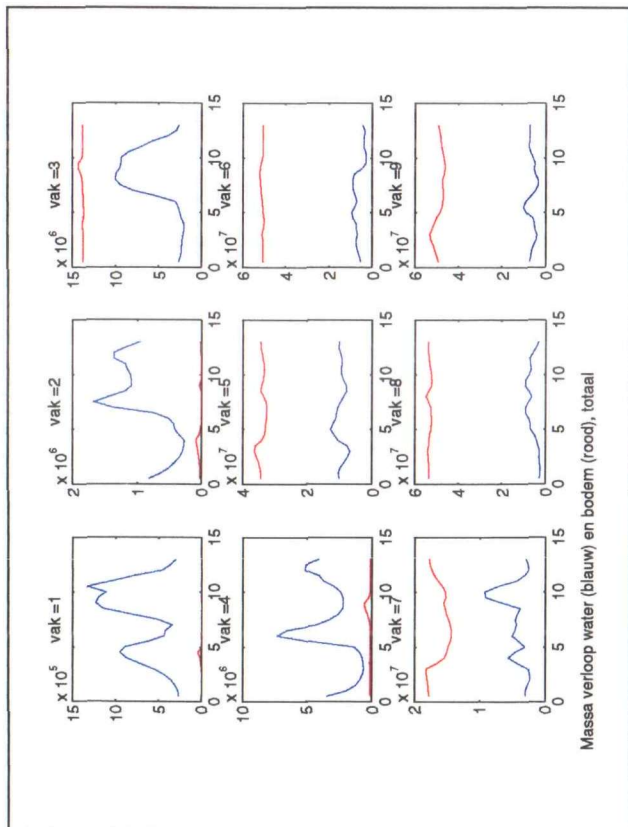
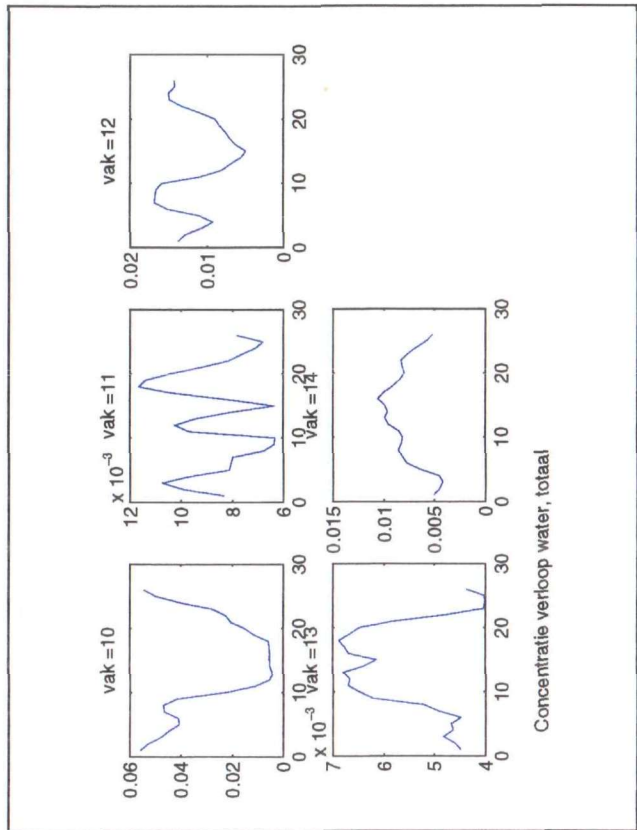
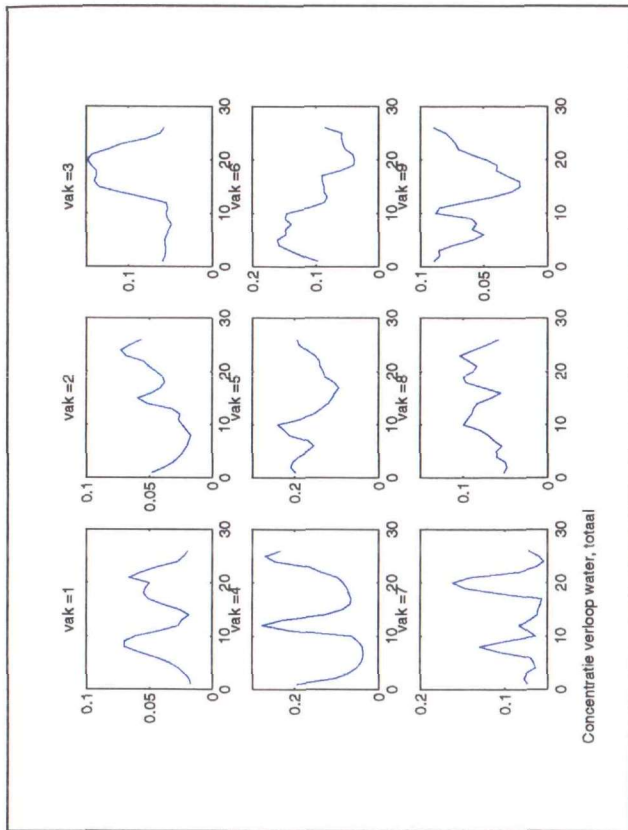


model : Scale400 model, Horizontal Euler residual velocity in layer 9, datum : 890412, tijd : 2000

Figuur 10 Het reststroompatroon aan het wateroppervlak en aan de bodem in het oostelijk deel van de Westerschelde.

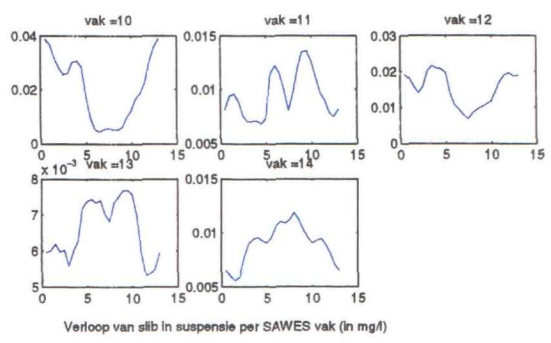
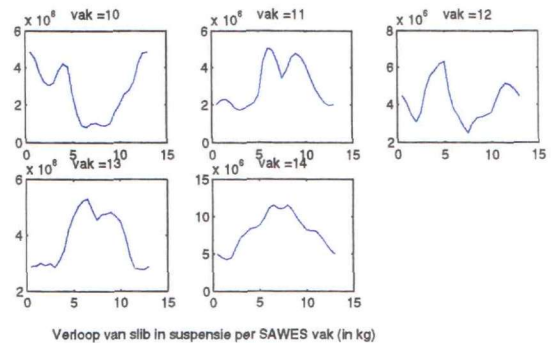
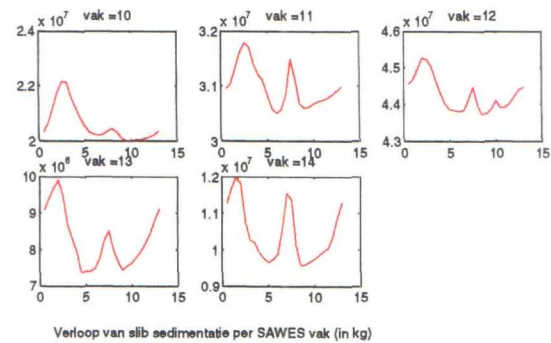
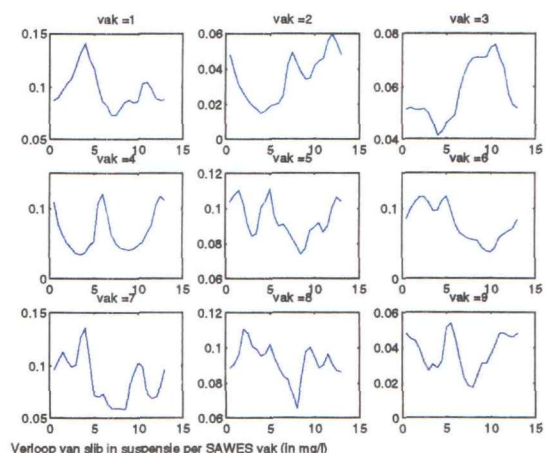
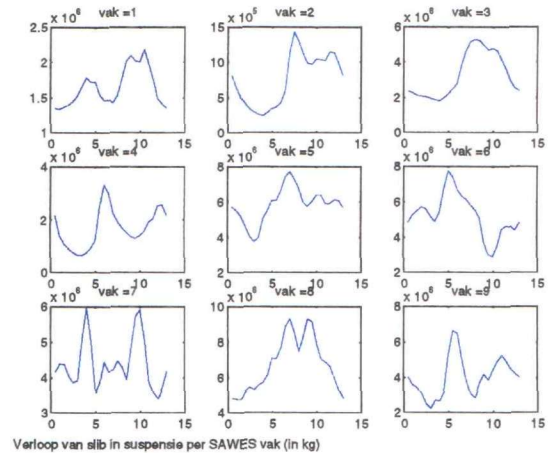
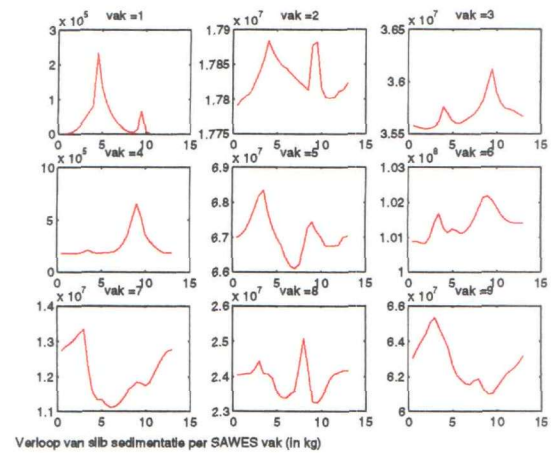


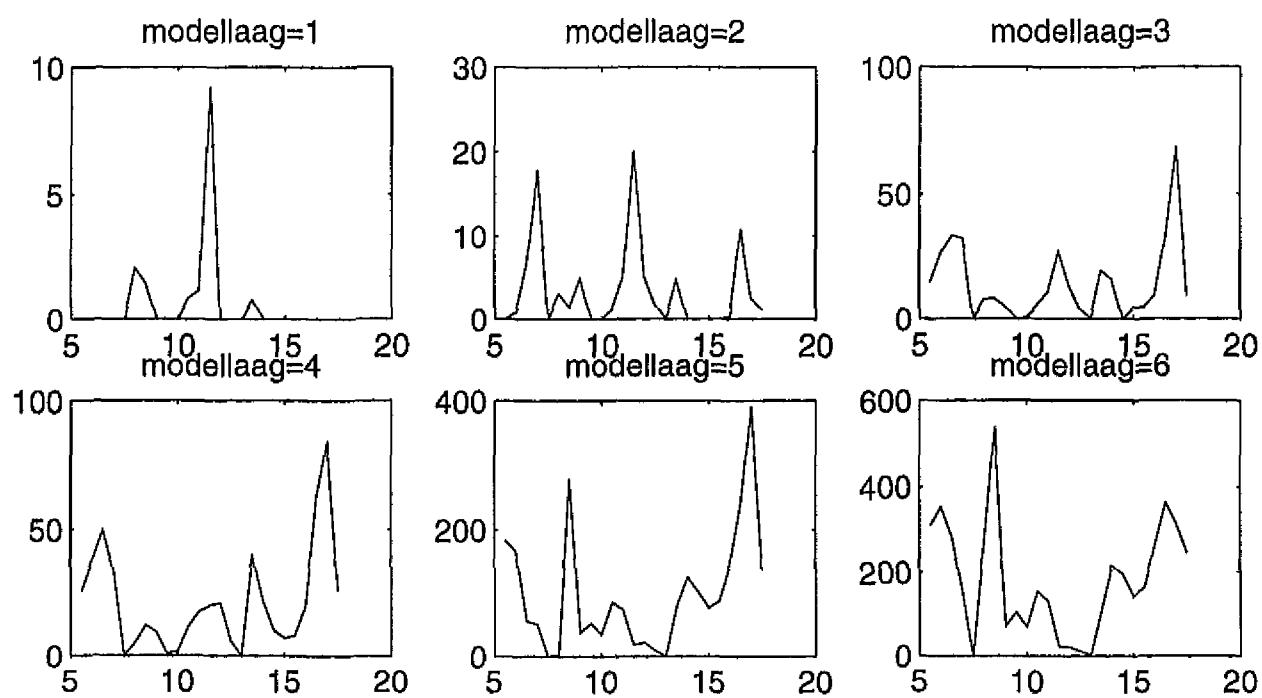
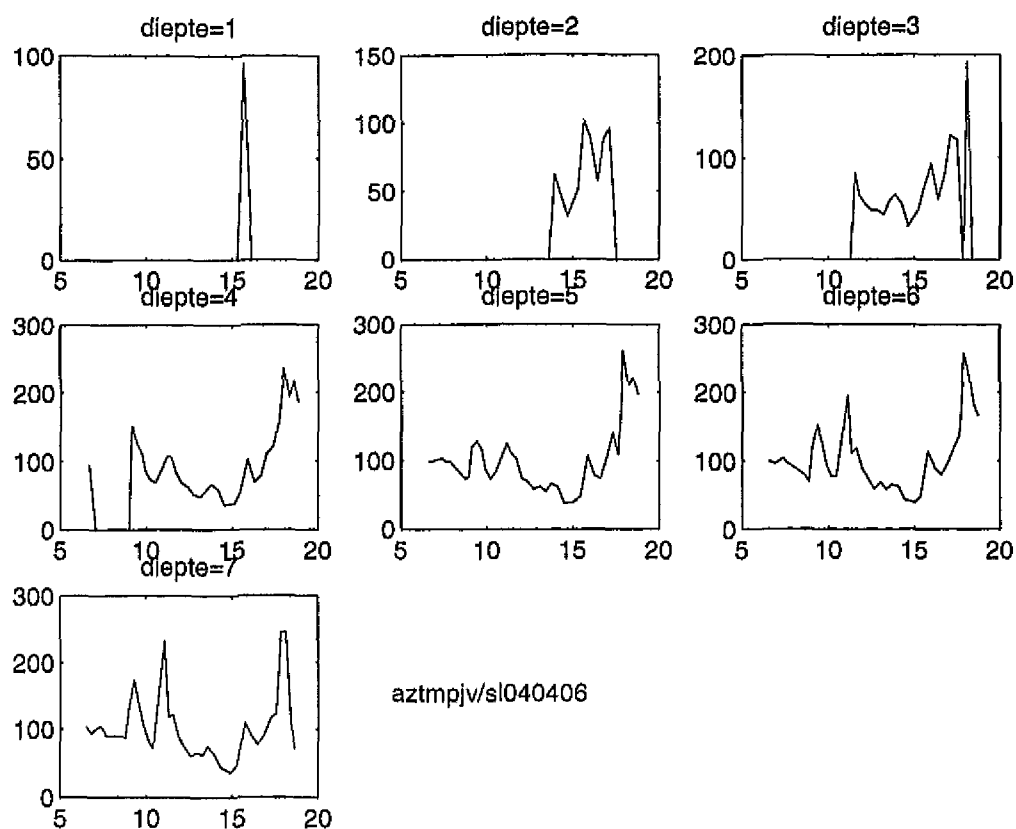
Figuur 11.1 Slibmassa verloop (in kg) over het getij voor de SAWES vakken.
Aparte berekening voor fluviatiel - en marien slib ten behoeve
van de balansbepaling.



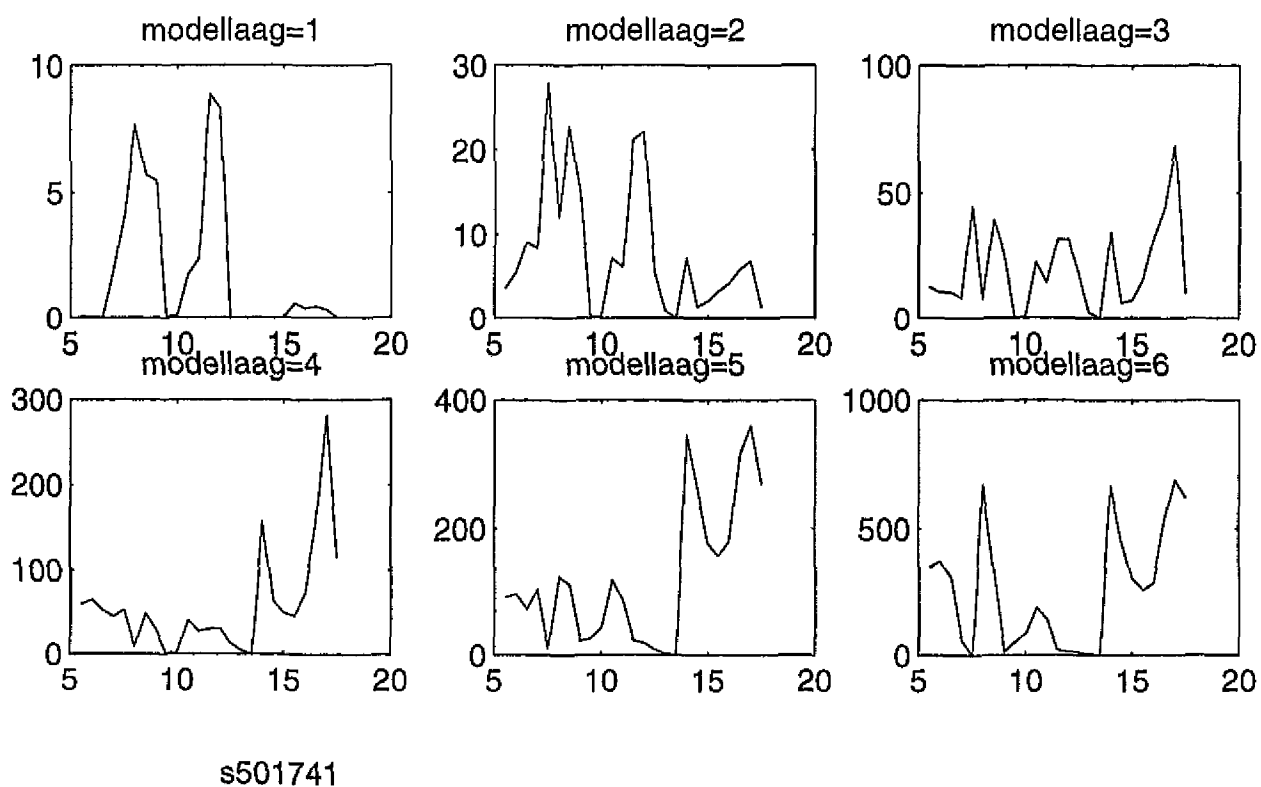
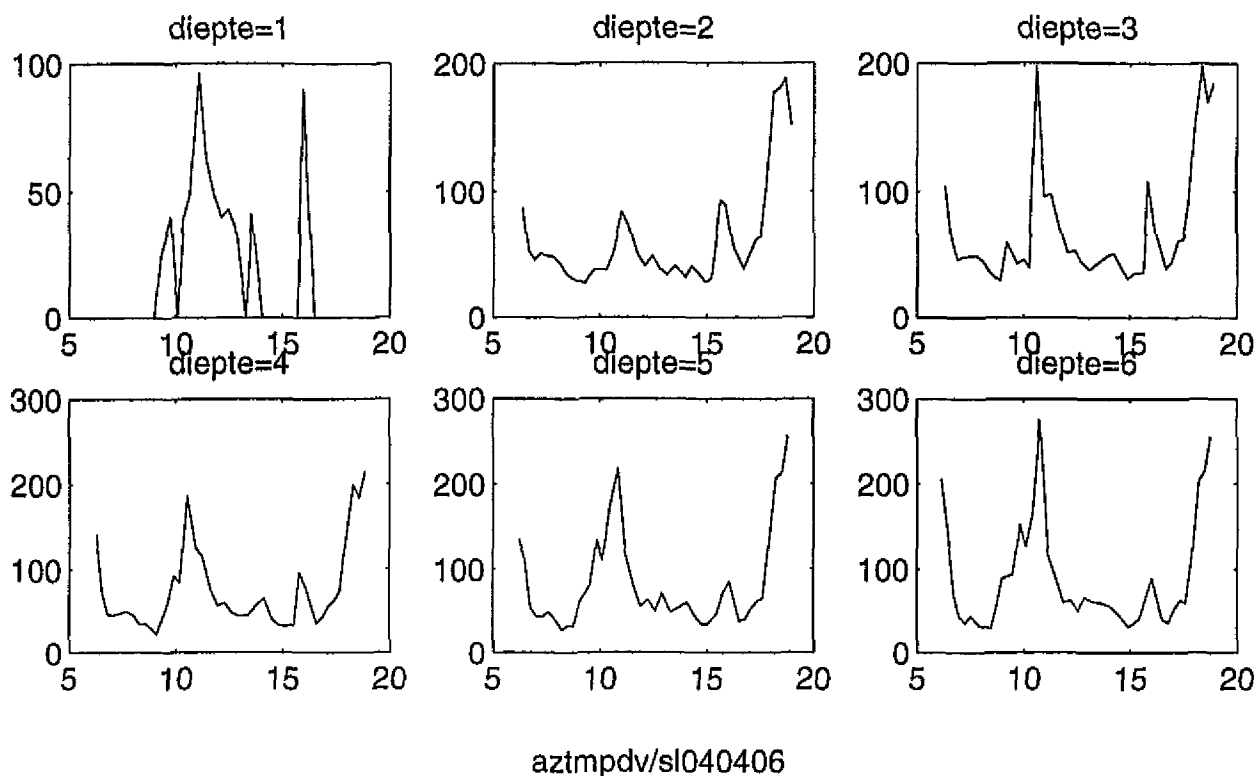
Figuur 11.2 Slibmassa (in kg) en concentratie (in mg/l) verloop voor de SAWES vakken. Resultaat van de balansberekeningen voor fluviaal - en marien slib achteraf opgeteld.

Figuur 12 Silbmassa (in kg) en concentratie (in mg/l) verloop over het getij voor de berekening met initiële silbmassa.

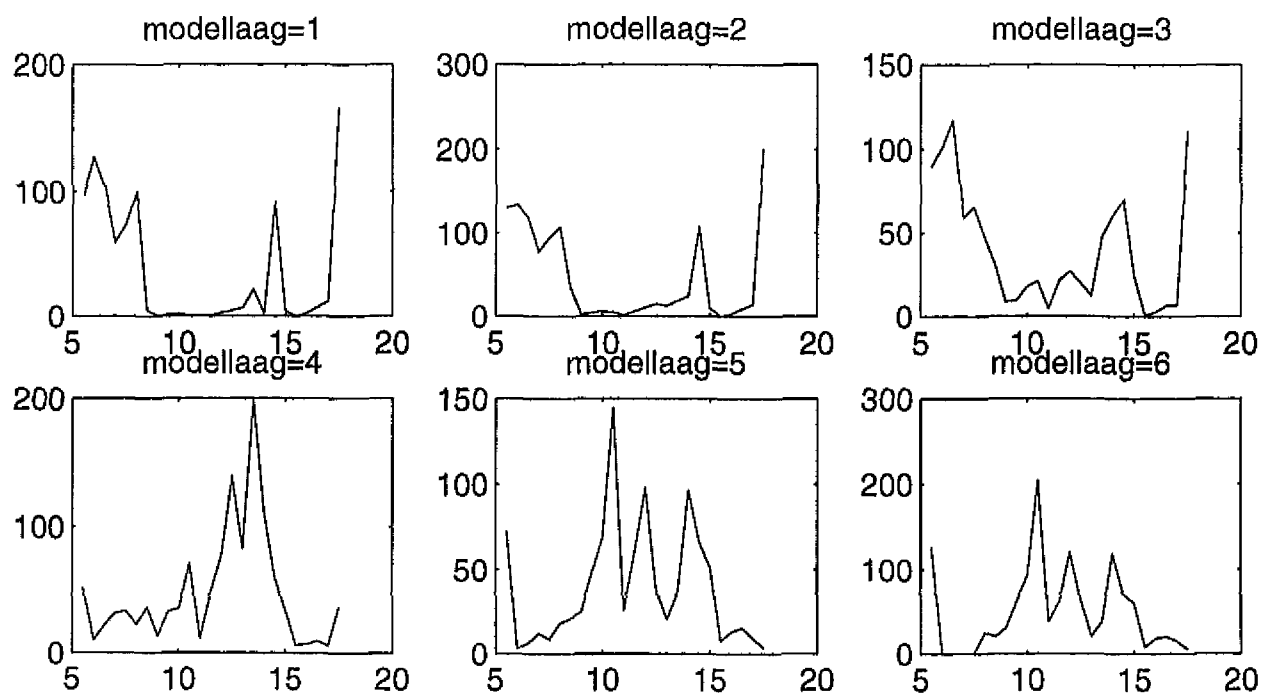
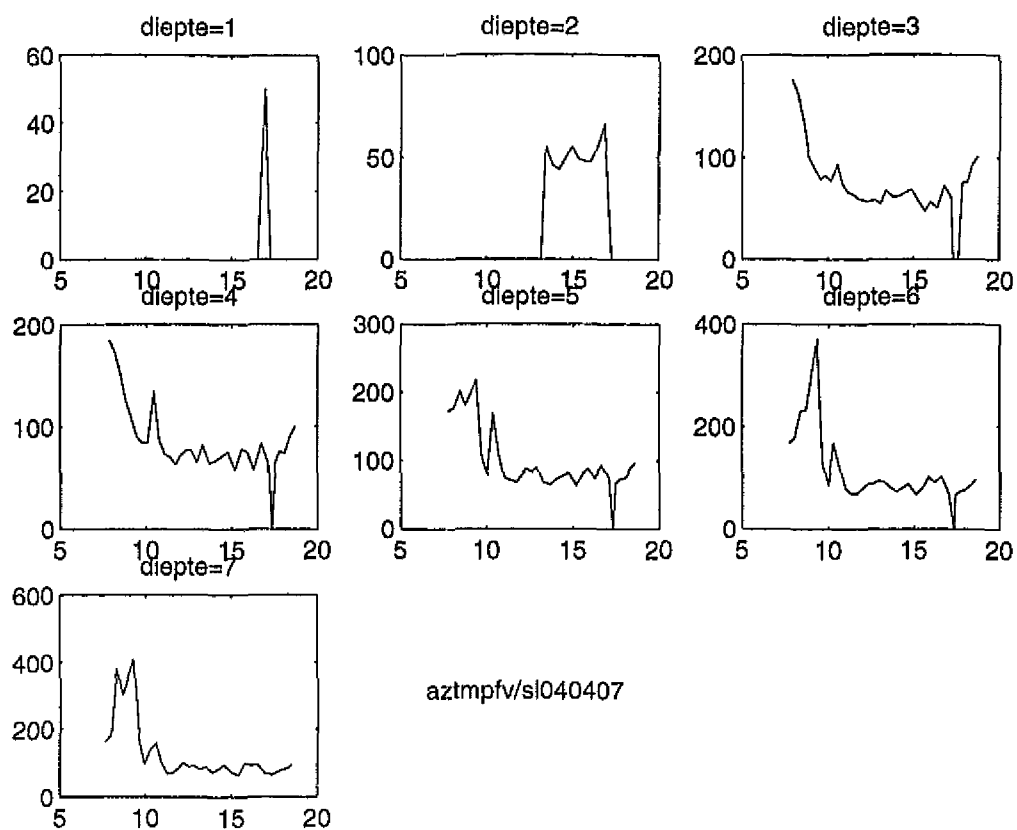




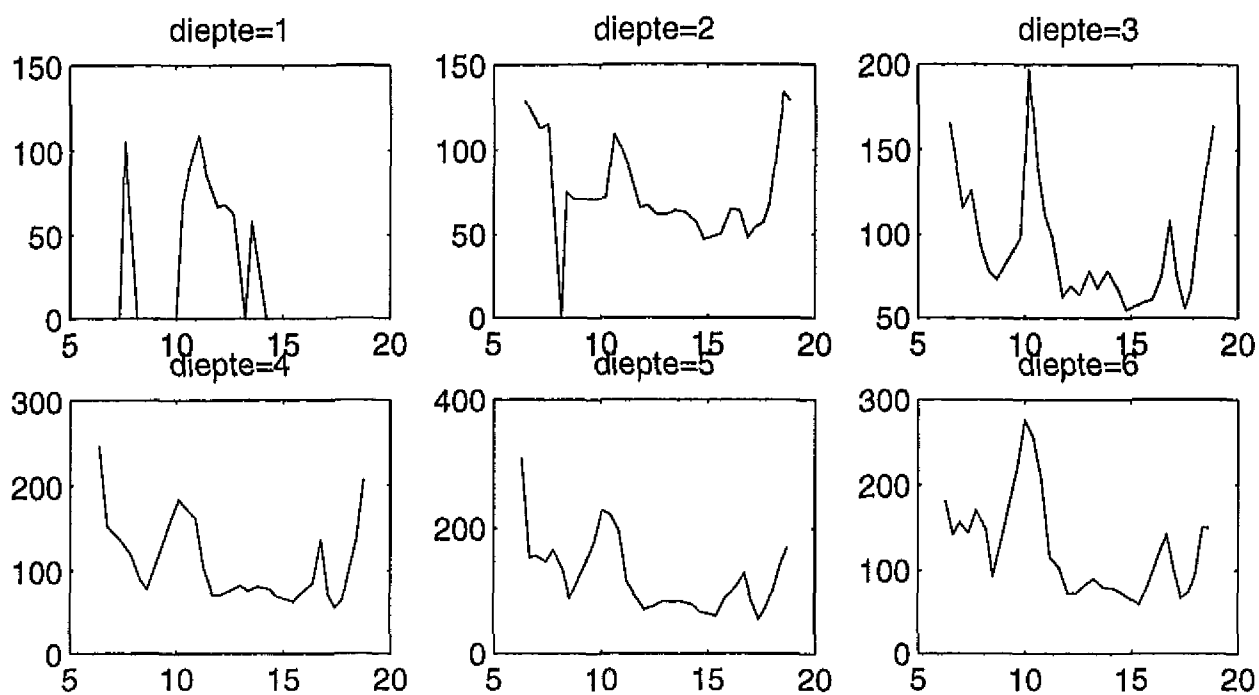
Figuur 13.1 Concentratie verloop (in mg/l) op 4 april 1989 in meetpunt 3 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).



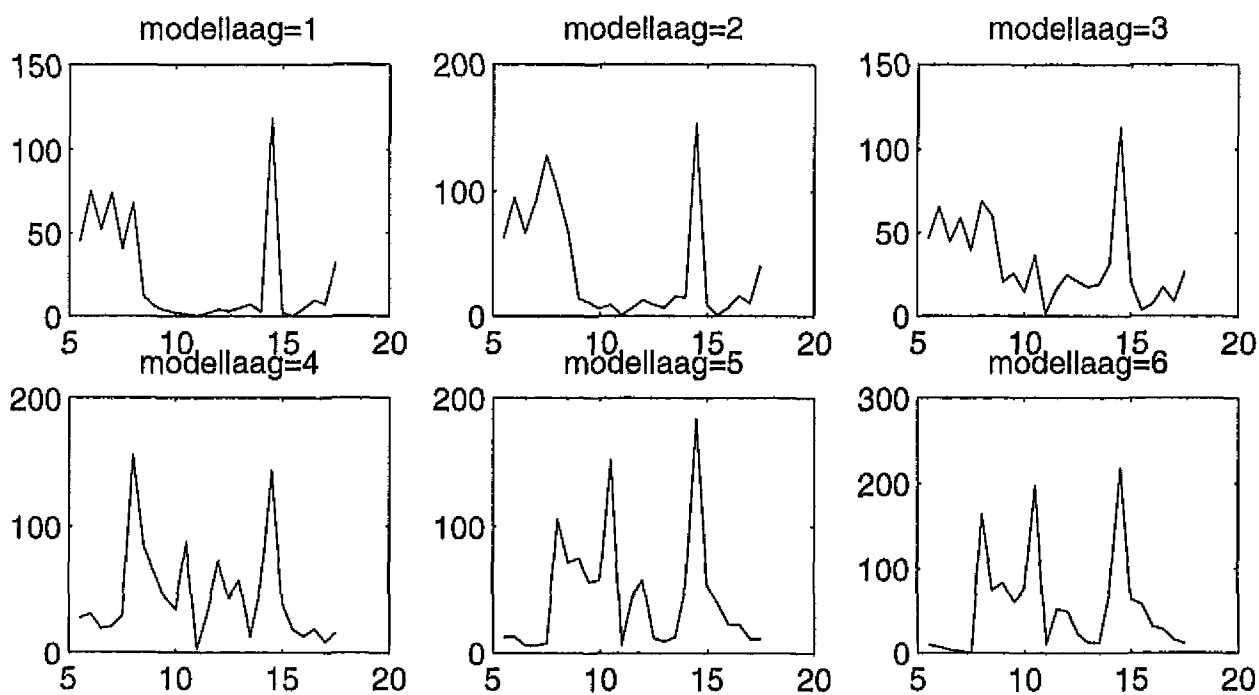
Figuur 13.2 Concentratie verloop (in mg/l) op 4 april 1989 in meetpunt 4 (figuur 4); model (onderste figuur) versus meting (boven).



Figuur 13.3 Concentratie verloop (in mg/l) op 4 april 1989 in meetpunt 8 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).

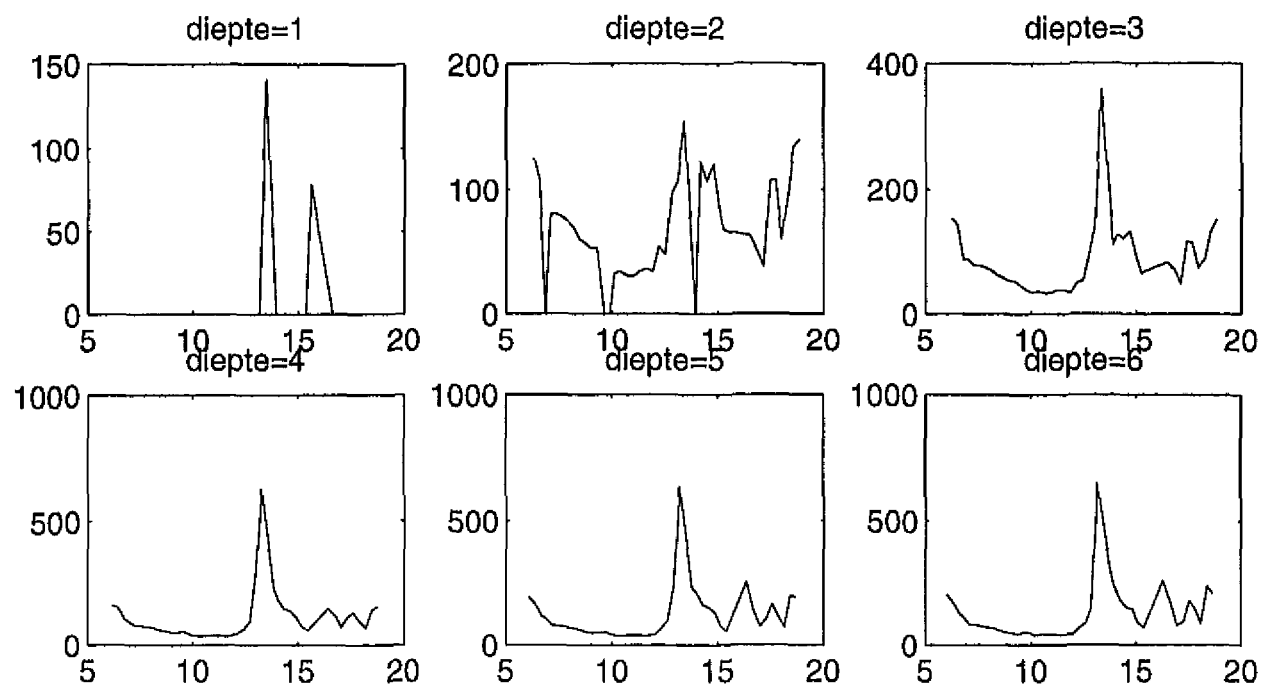


aztmpiv/sl040406

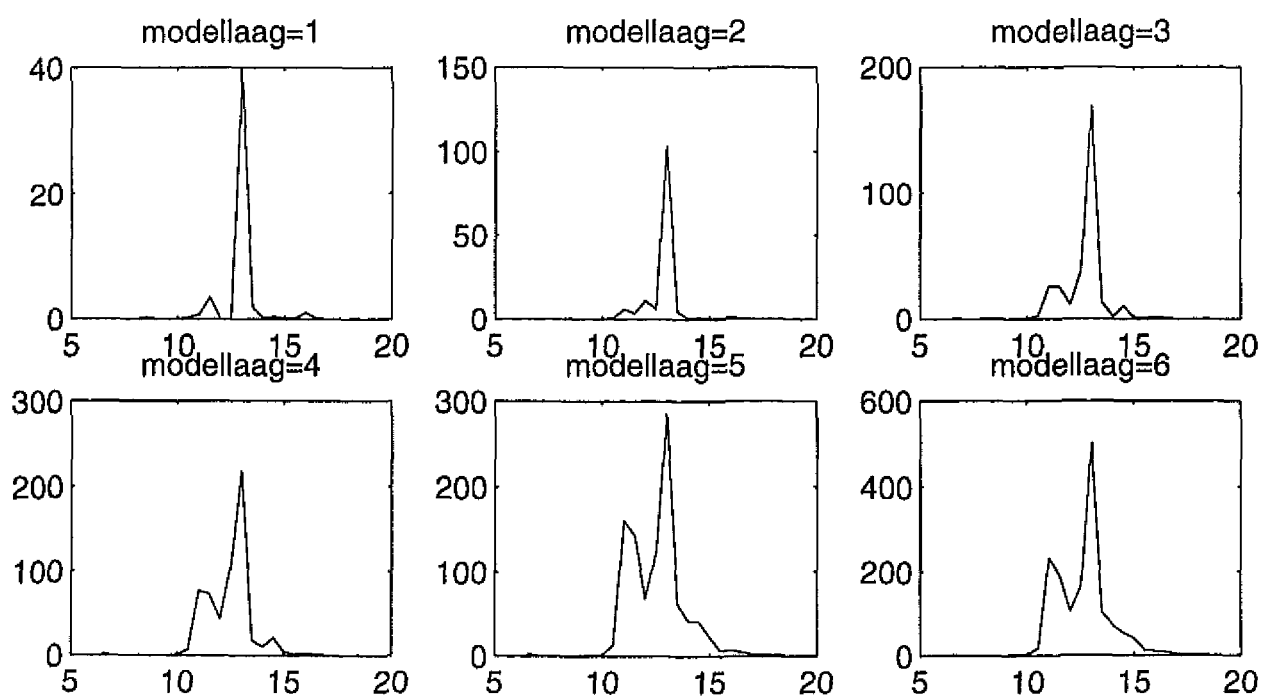


s481741

Figuur 13.4 Concentratie verloop (in mg/l) op 4 april 1989 in meetpunt 6 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).

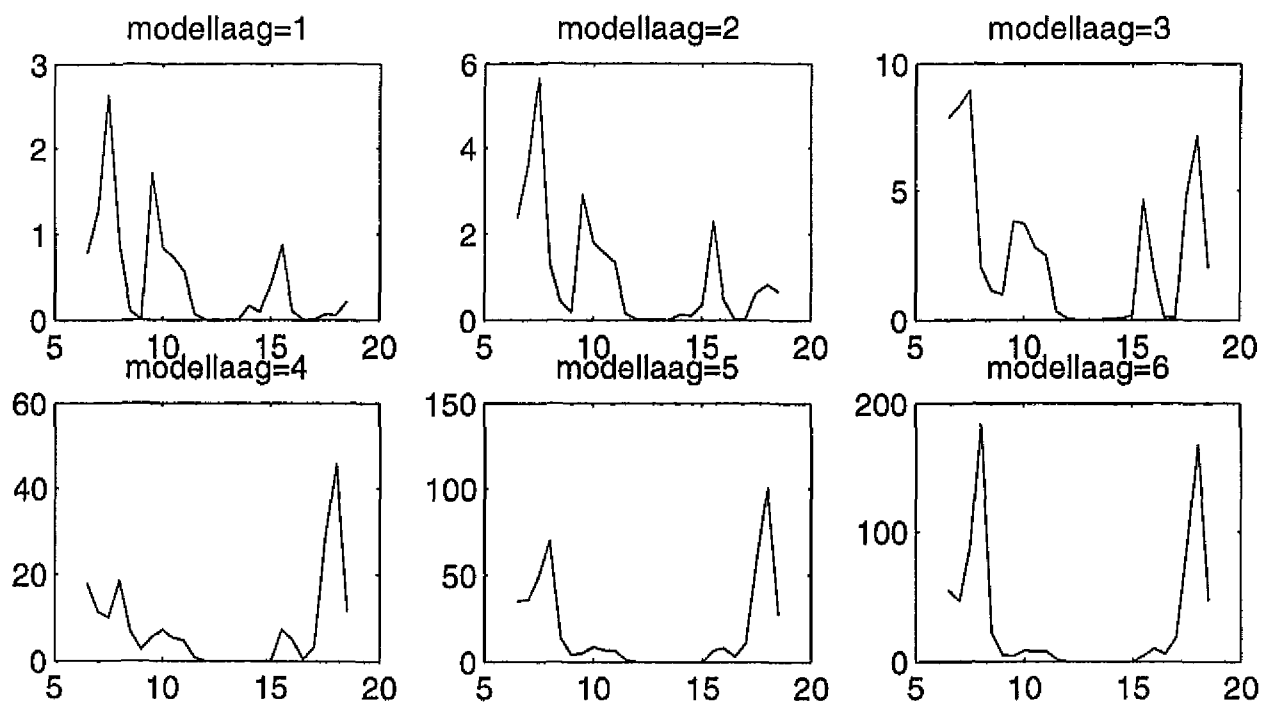
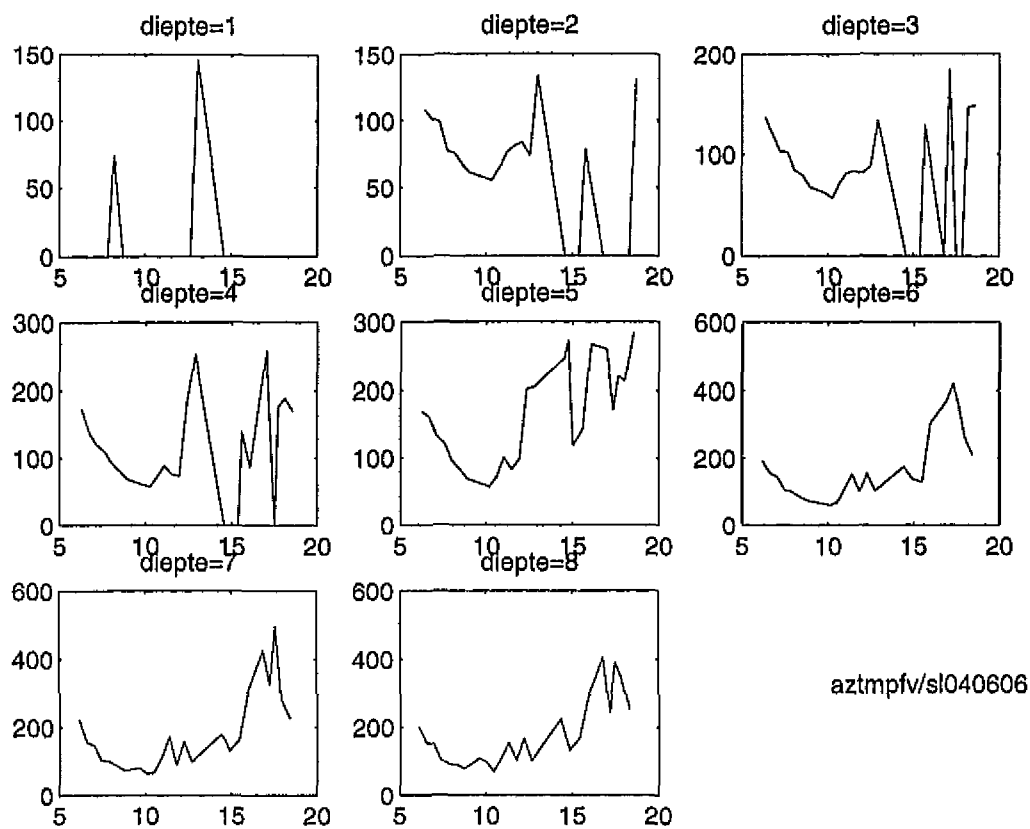


aztmpdv/sl040606

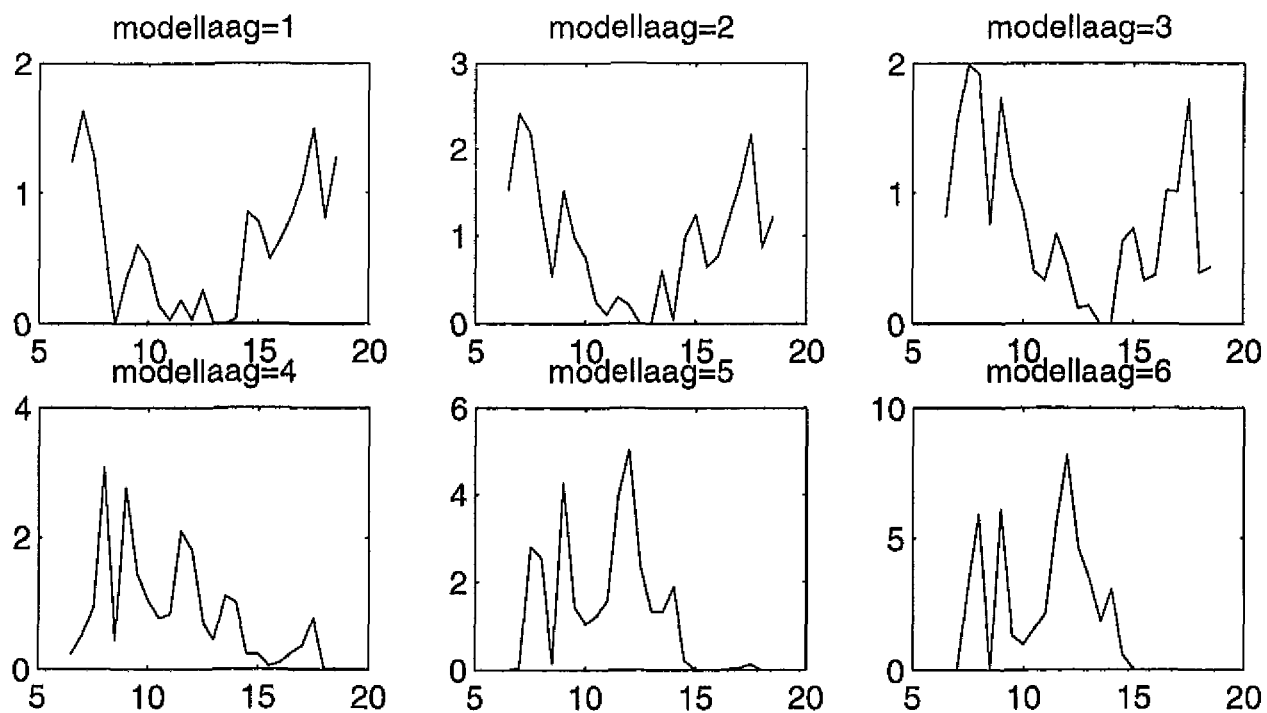
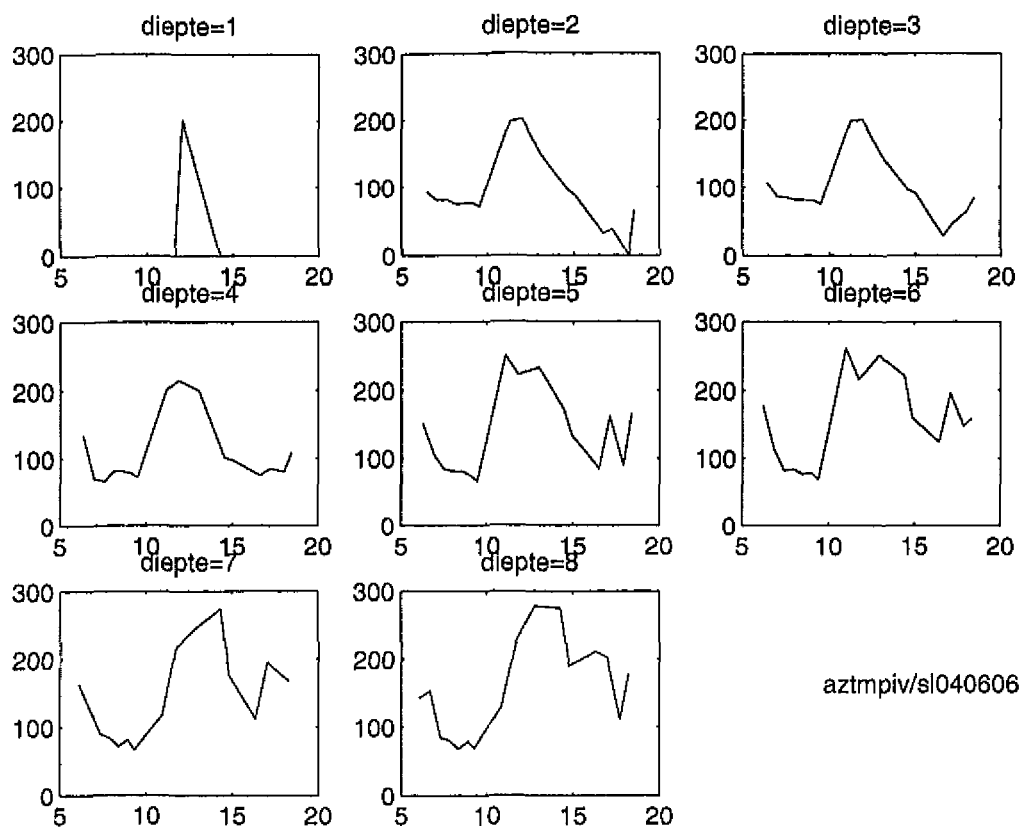


s561061

Figuur 14.1 Concentratie verloop (in mg/l) op 6 april 1989 in meetpunt 5 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).

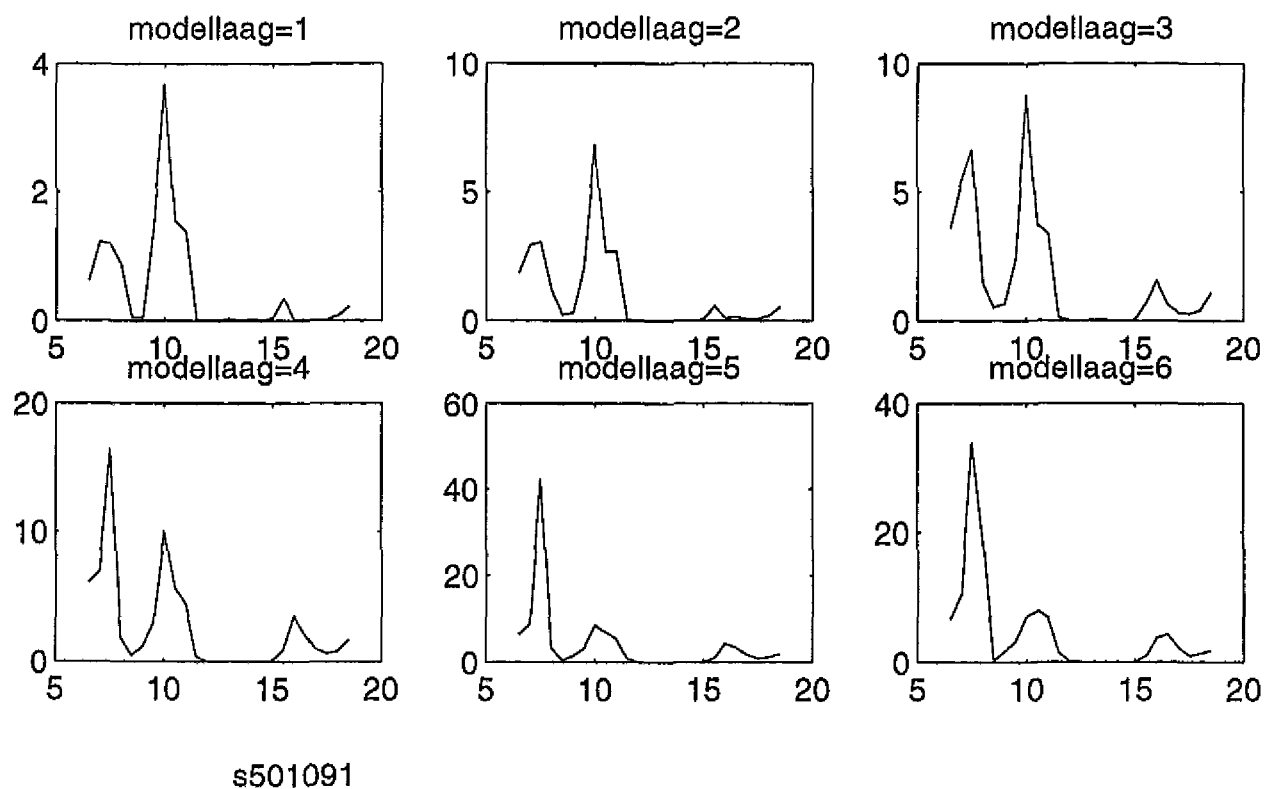
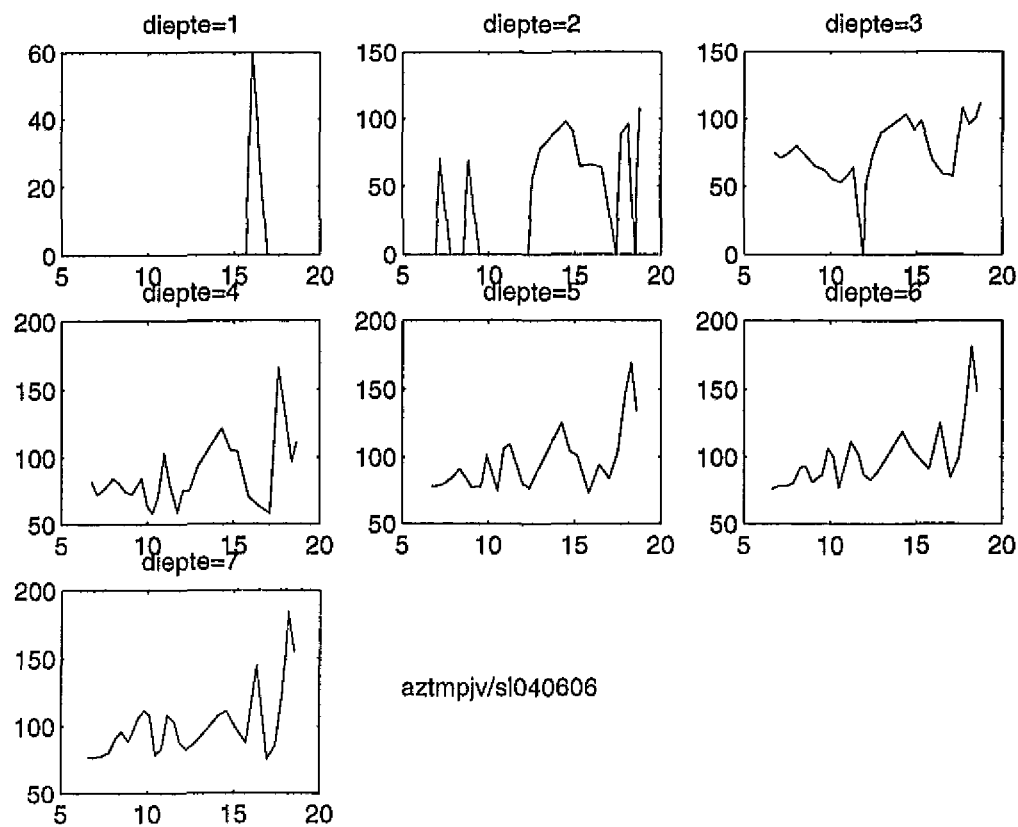


Figuur 14.2 Concentratie verloop (in mg/l) op 6 april 1989 in meetpunt 11 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).

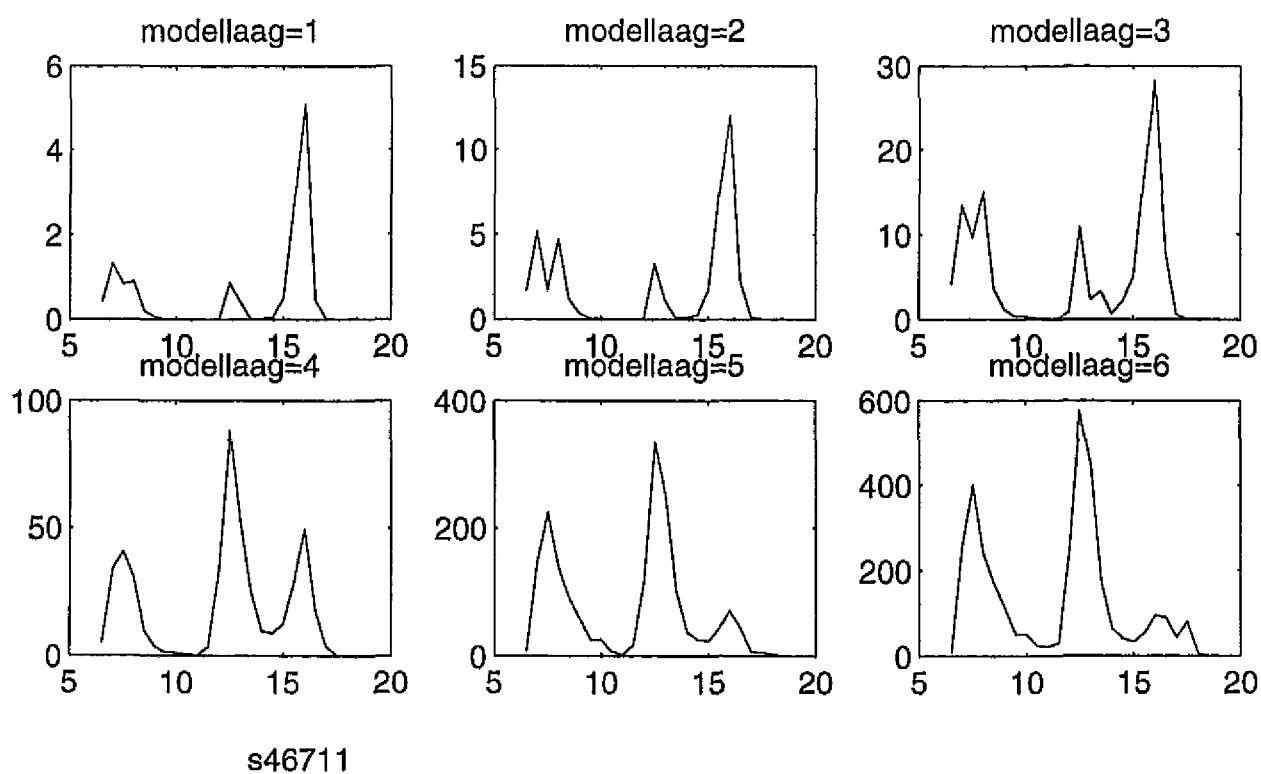
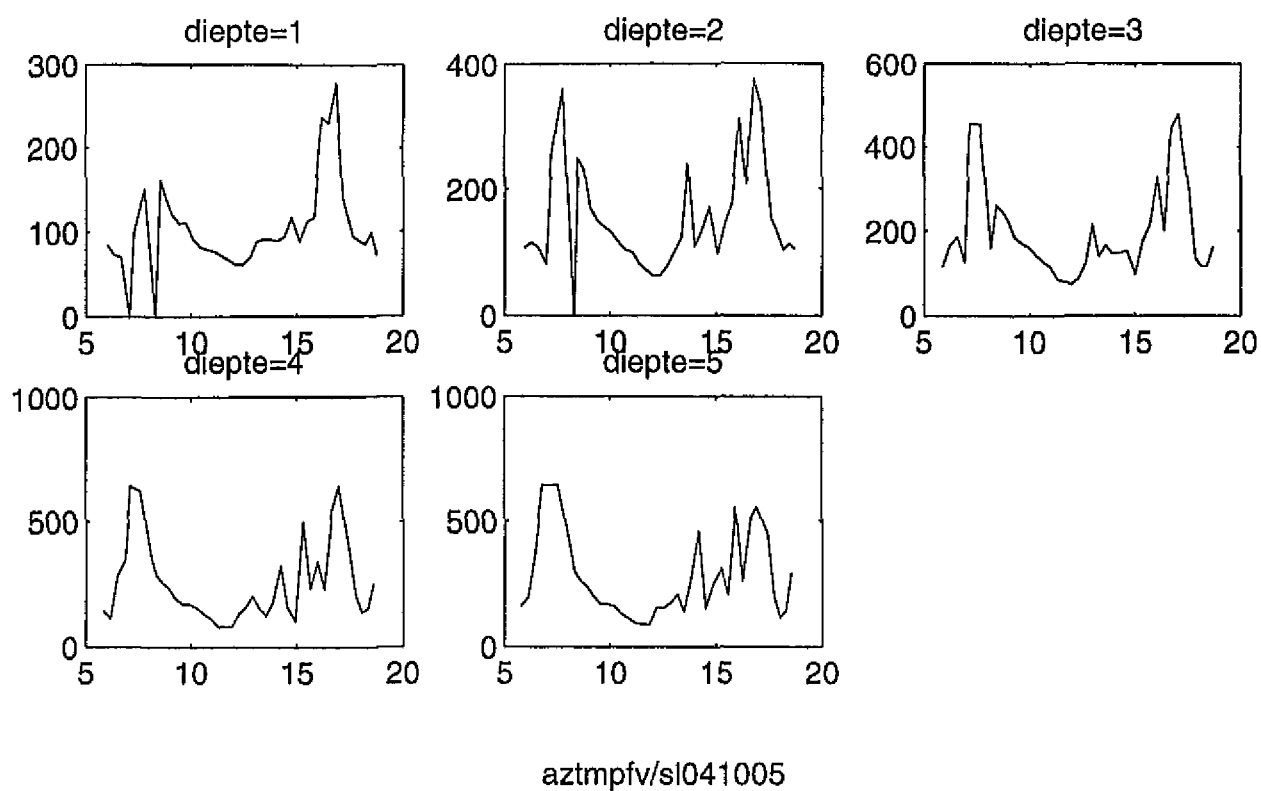


s581051

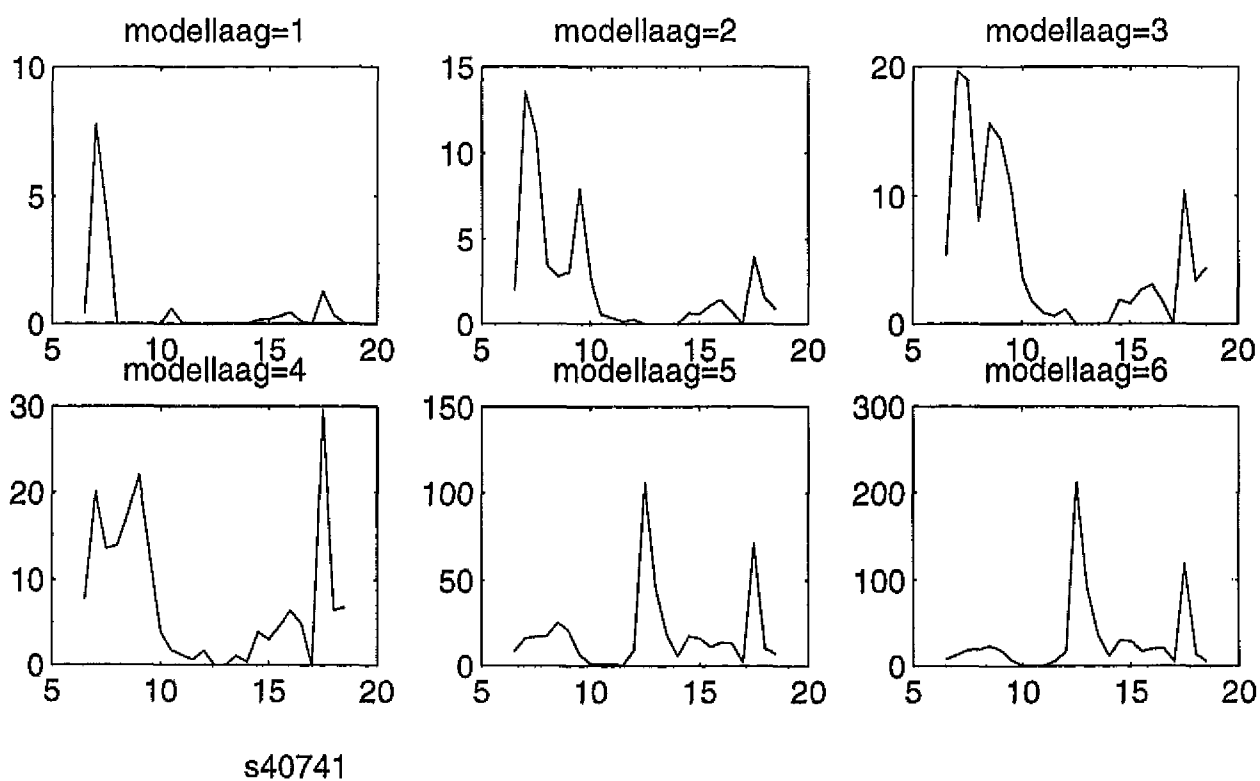
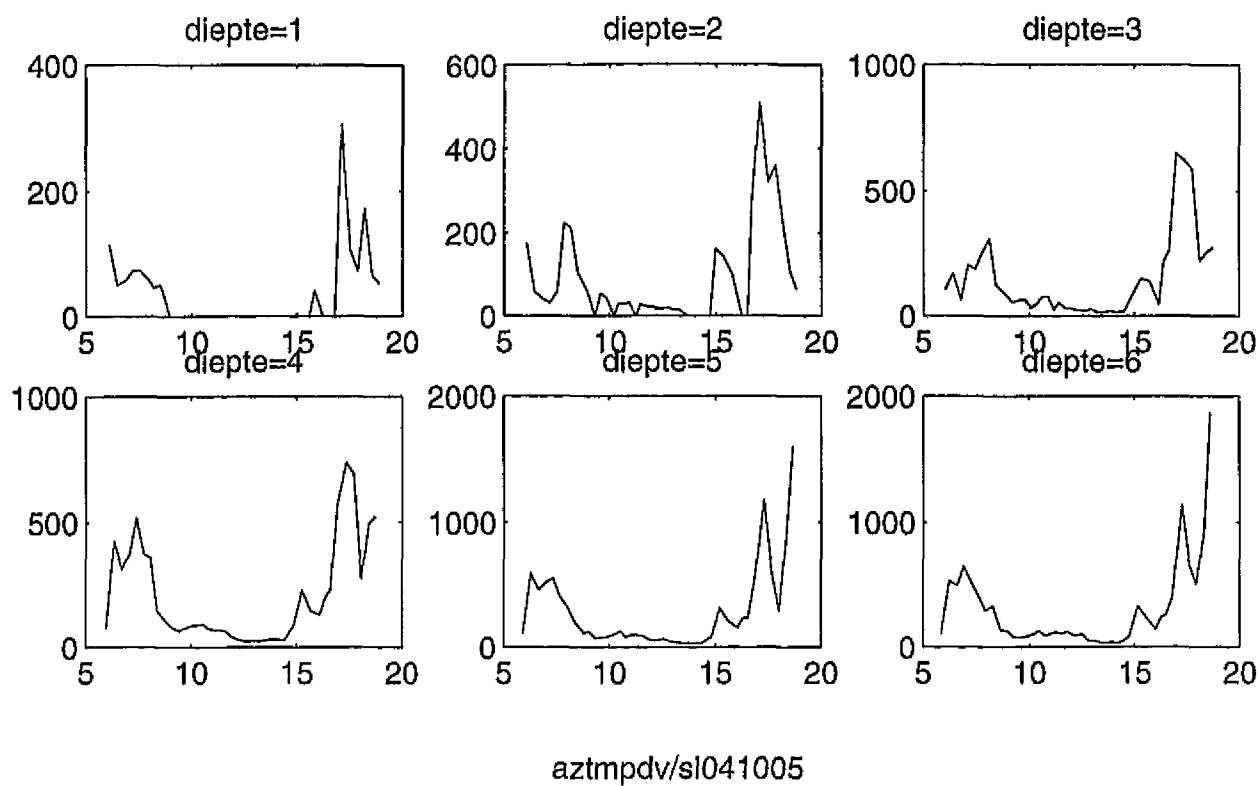
Figuur 14.3 Concentratie verloop (in mg/l) op 6 april 1989 in meetpunt 2 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).



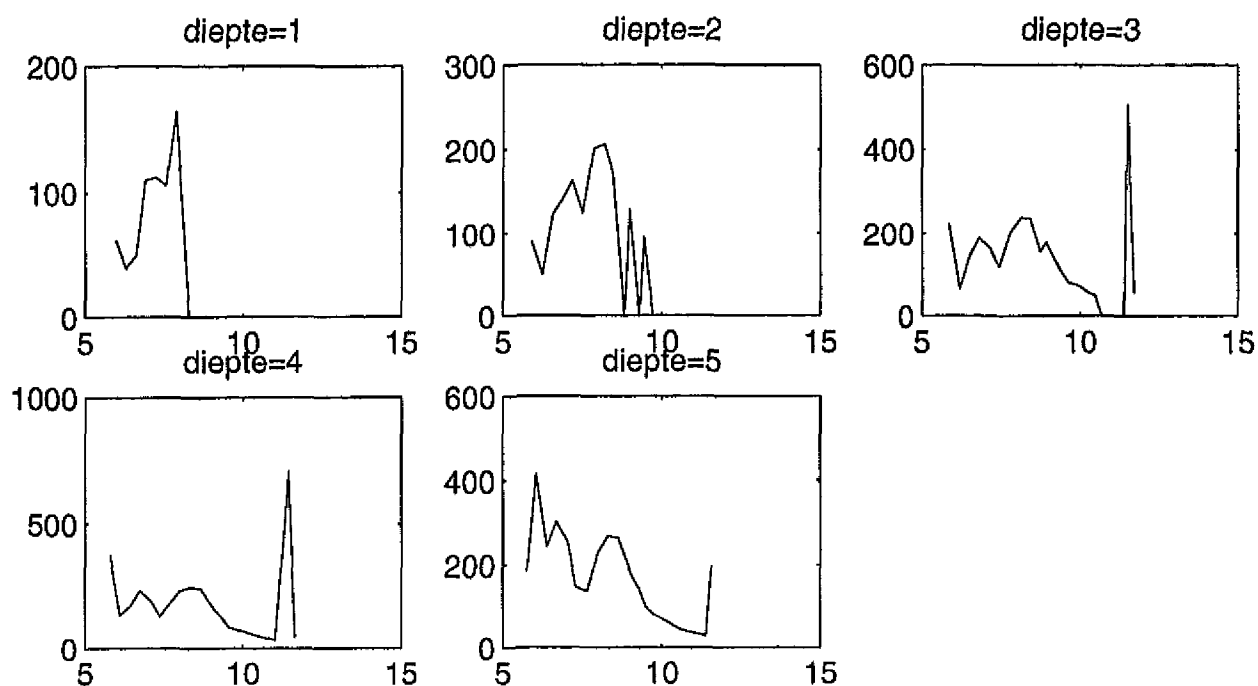
Figuur 14.4 Concentratie verloop (in mg/l) op 6 april 1989 in meetpunt 8 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).



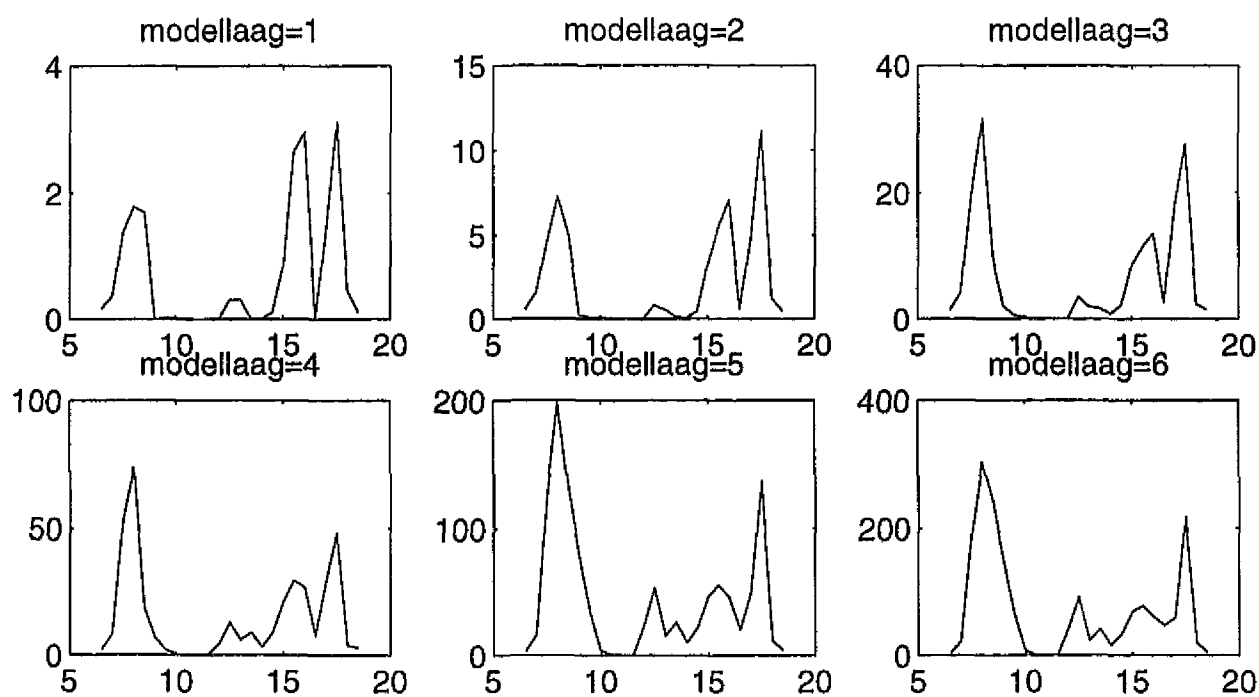
Figuur 15.1 Concentratie verloop (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 2 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).



Figuur 15.2 Concentratie verloop (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 6 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).

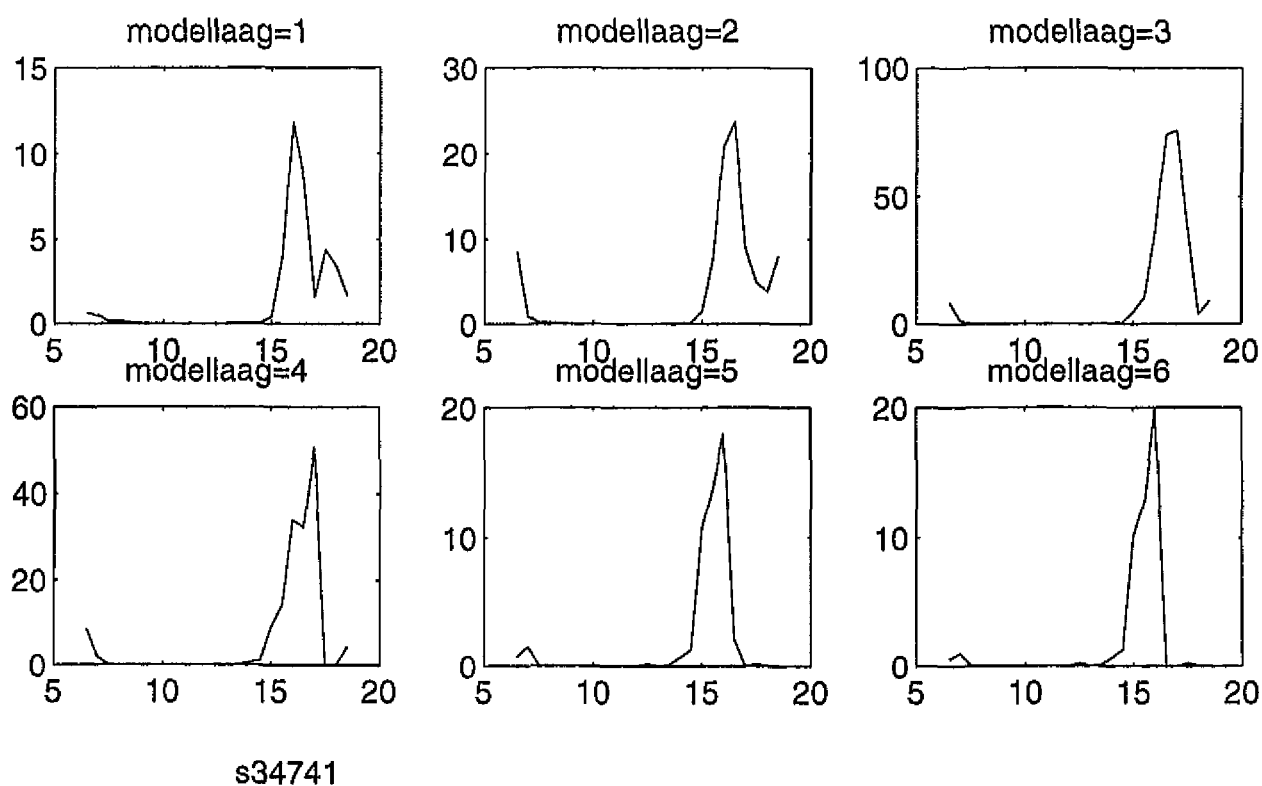
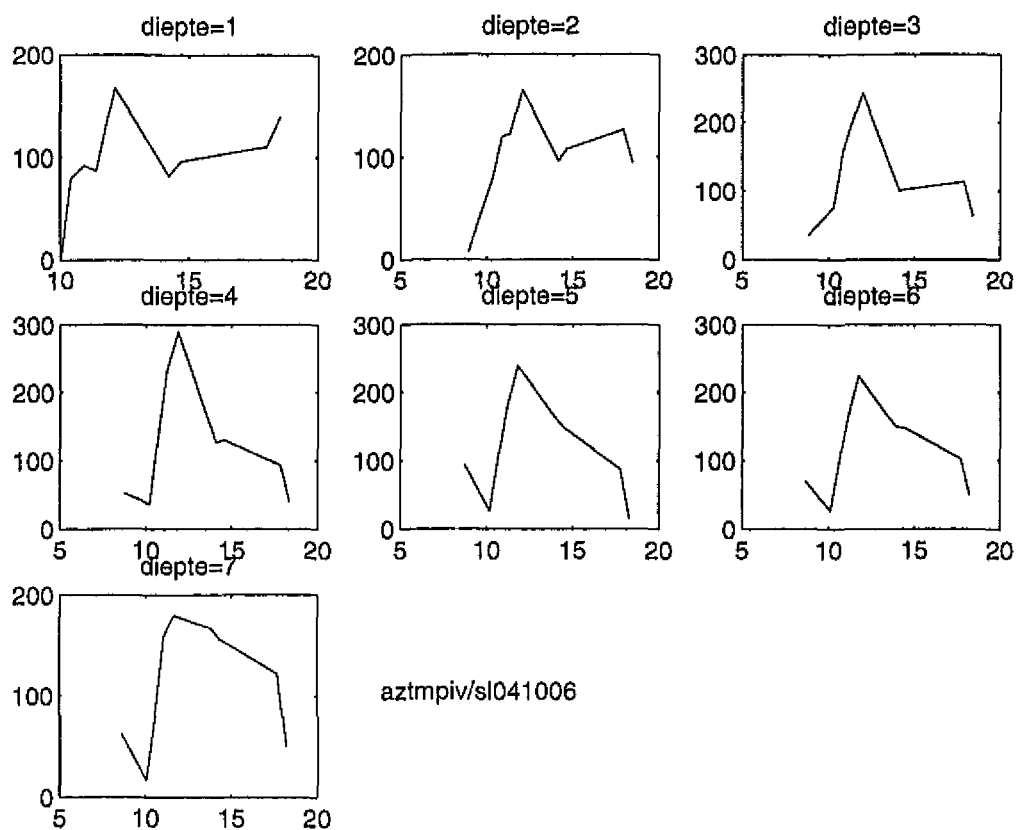


aztmpjv/sl041005

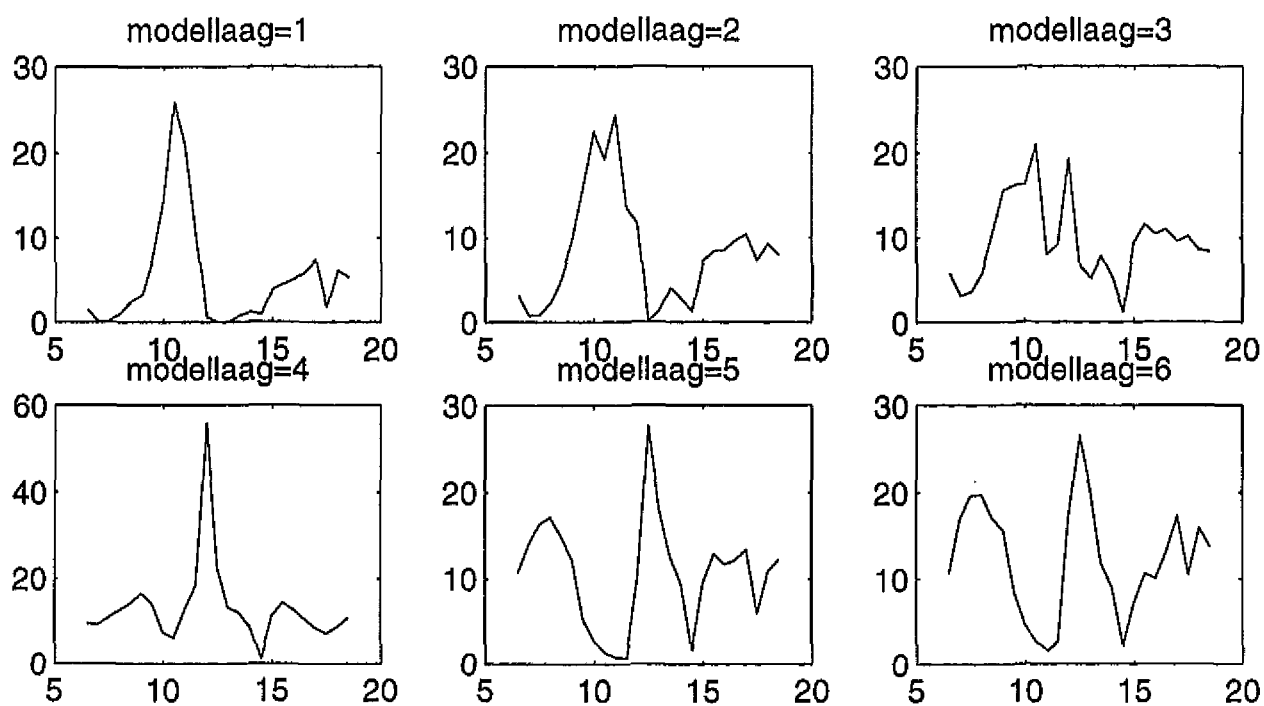
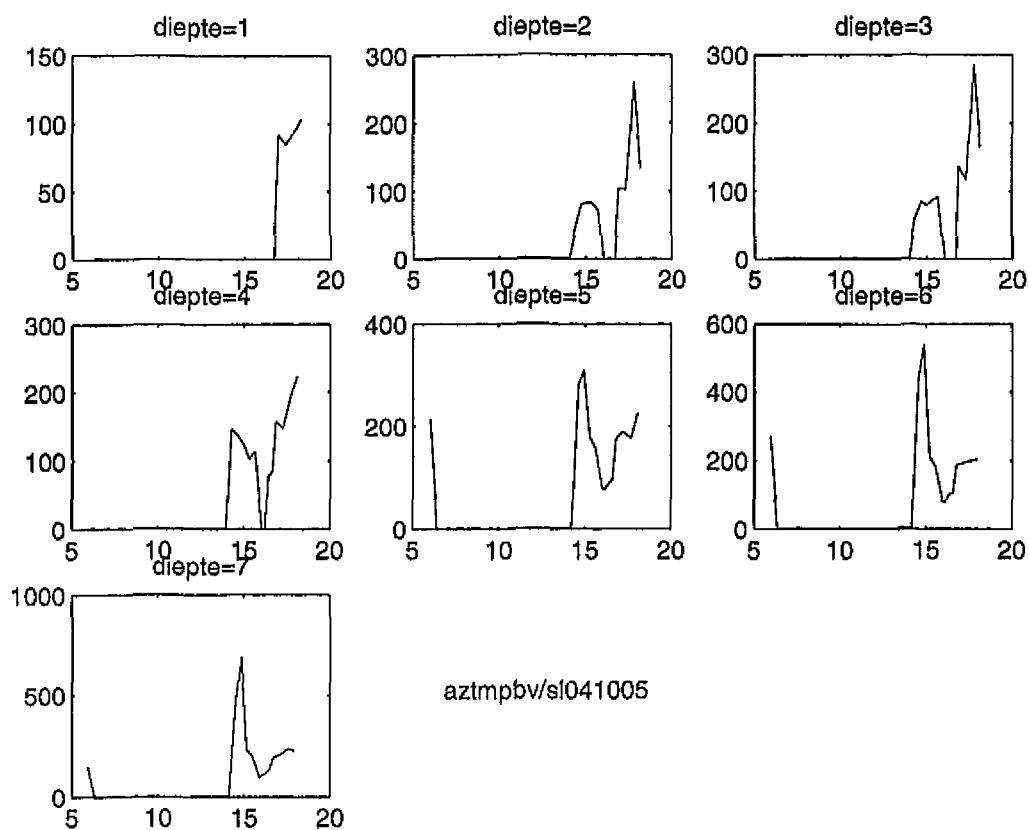


s45711

Figuur 15.3 Concentratie verloop (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 3 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).

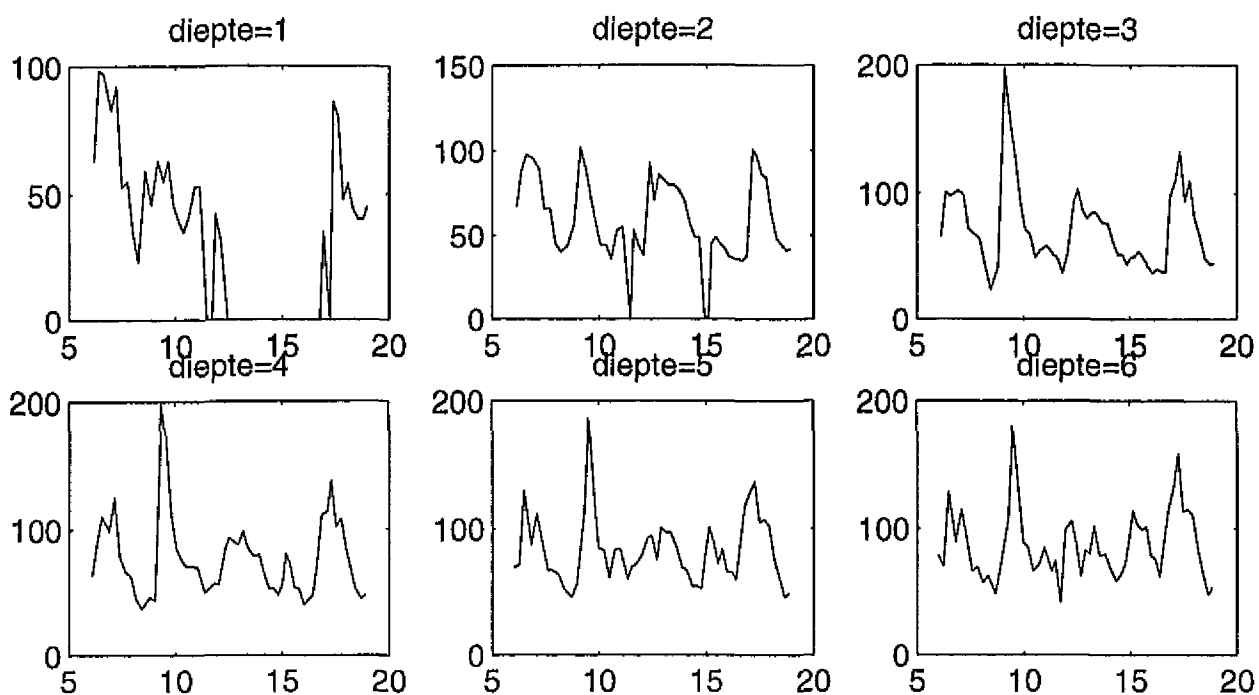


Figuur 15.4 Concentratie verloop (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 9 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).

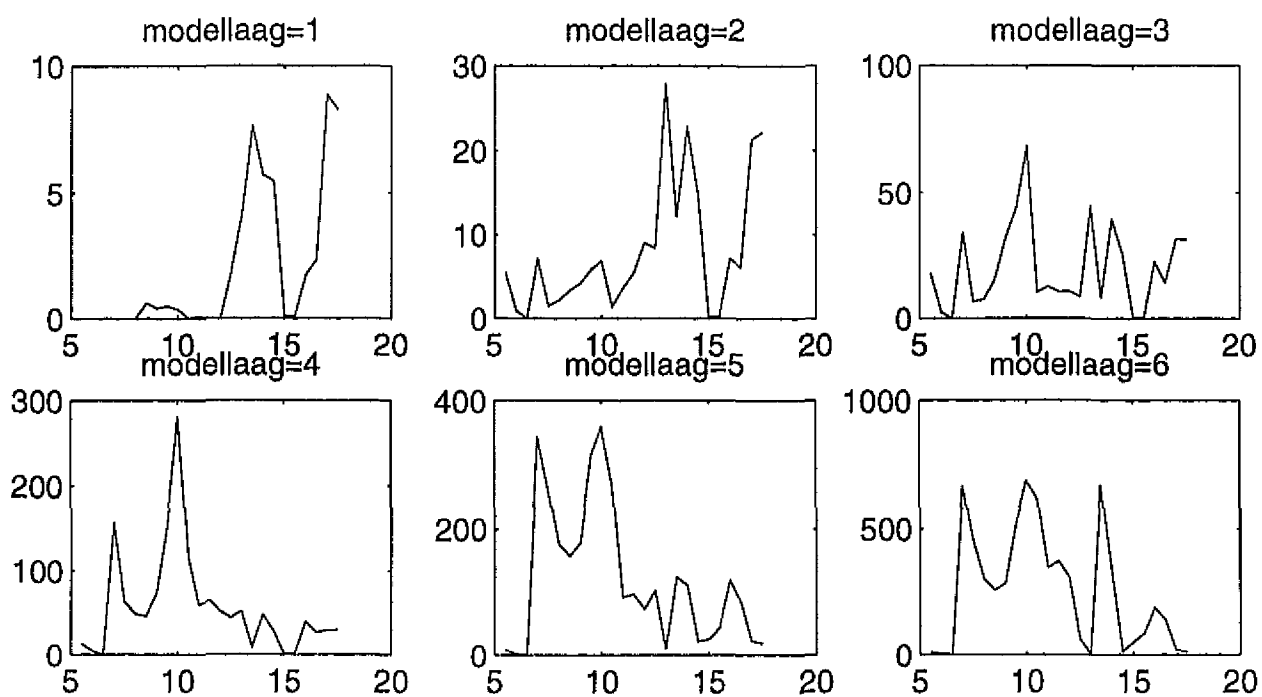


s38741

Figuur 15.5 Concentratie verloop (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt 7 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).

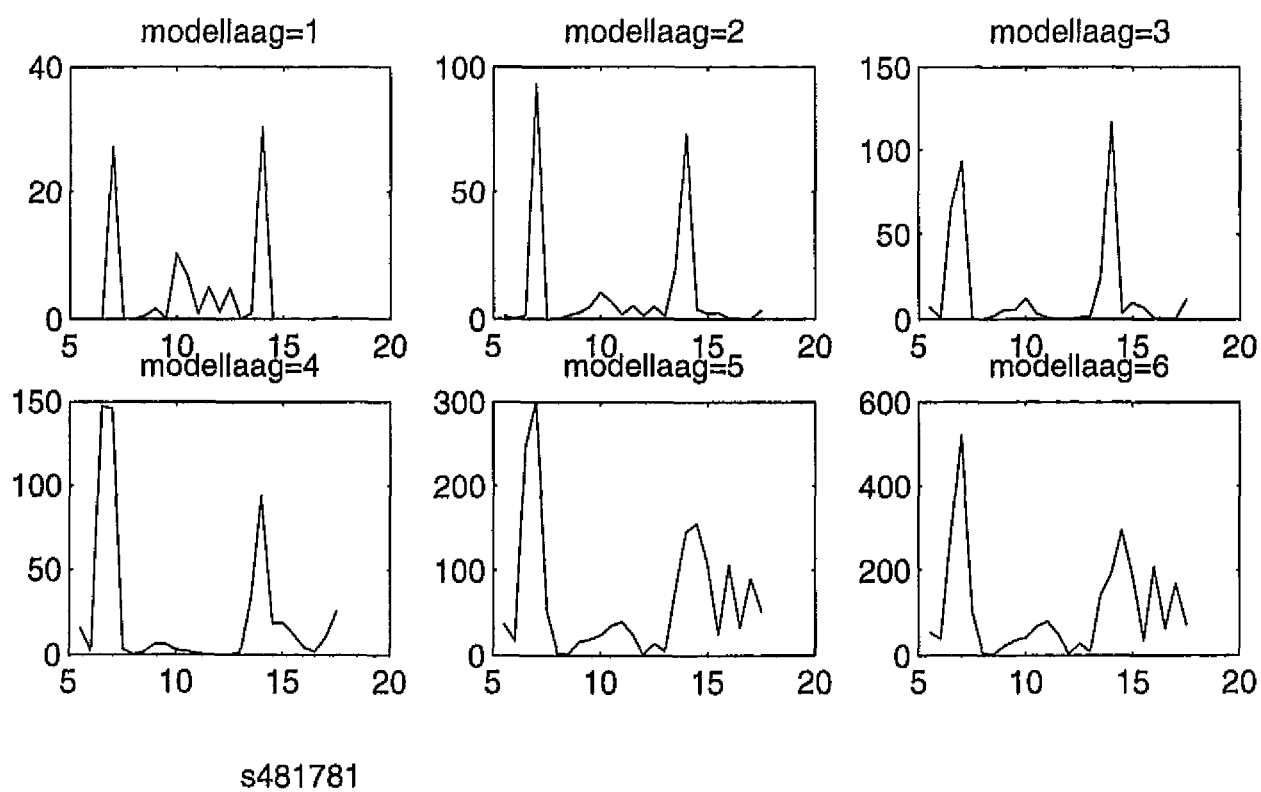
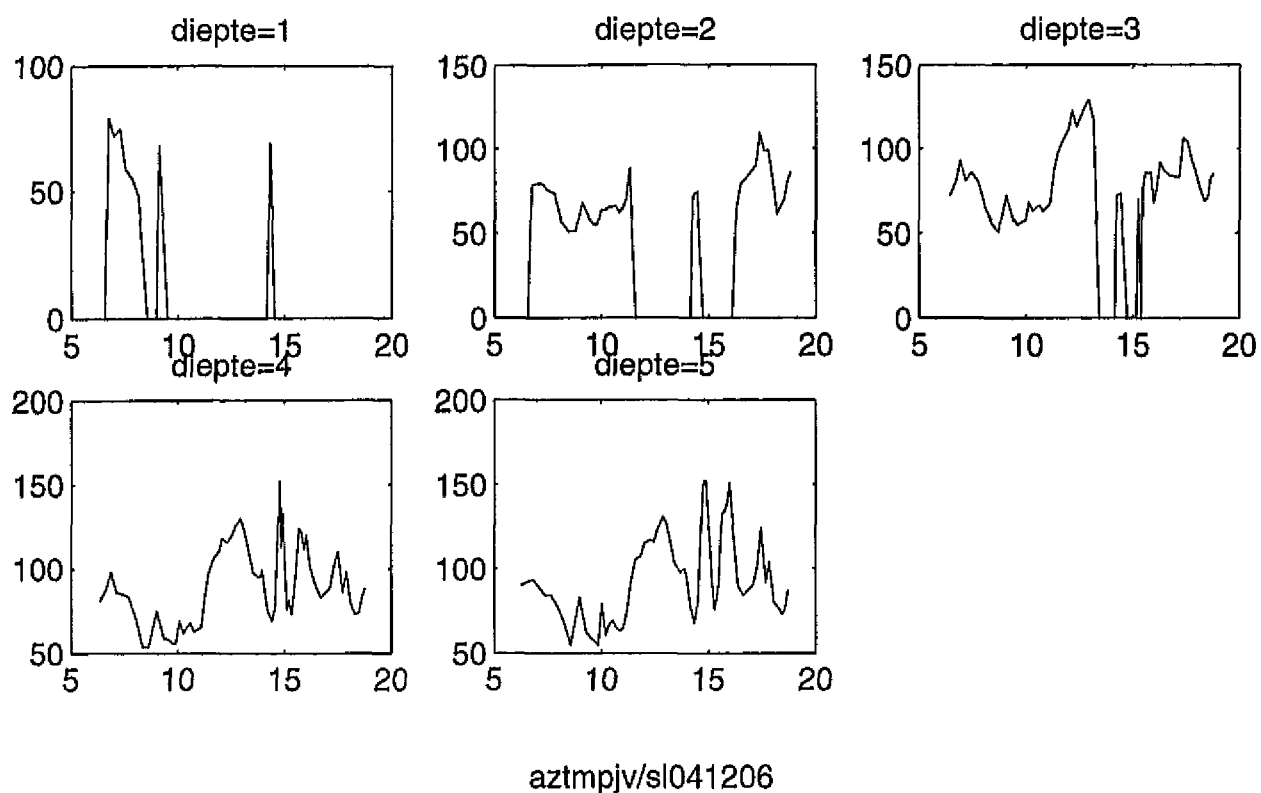


aztmpdv/sl041205

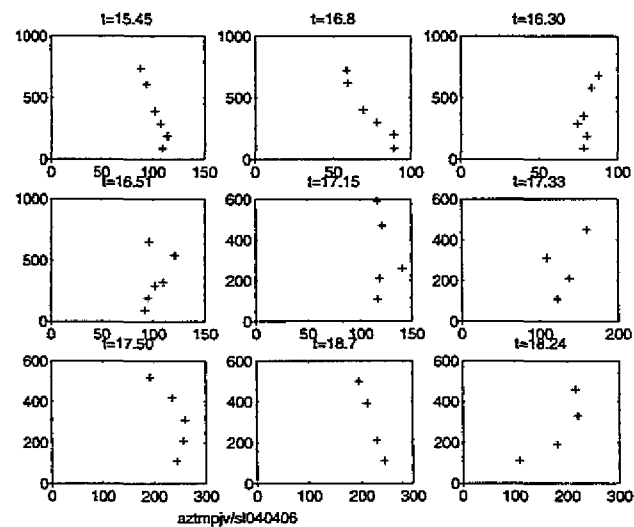
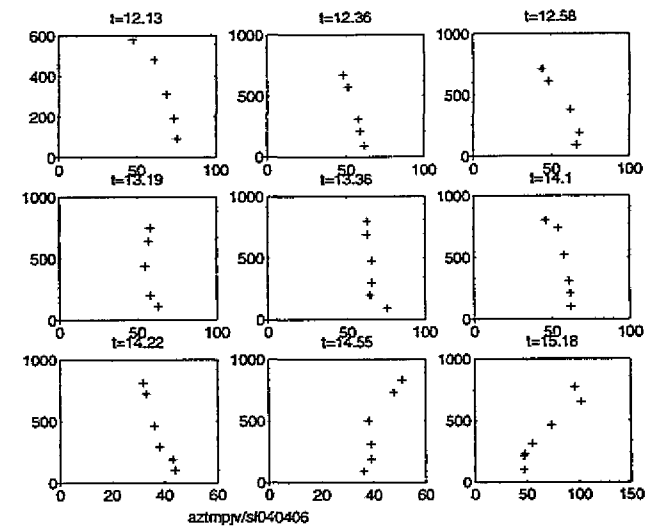
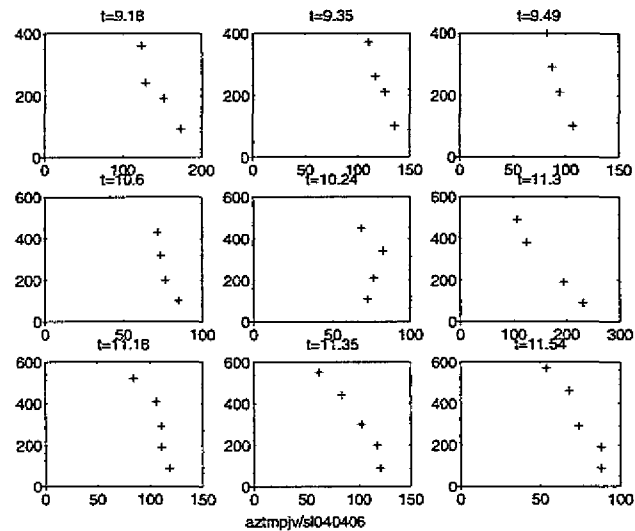
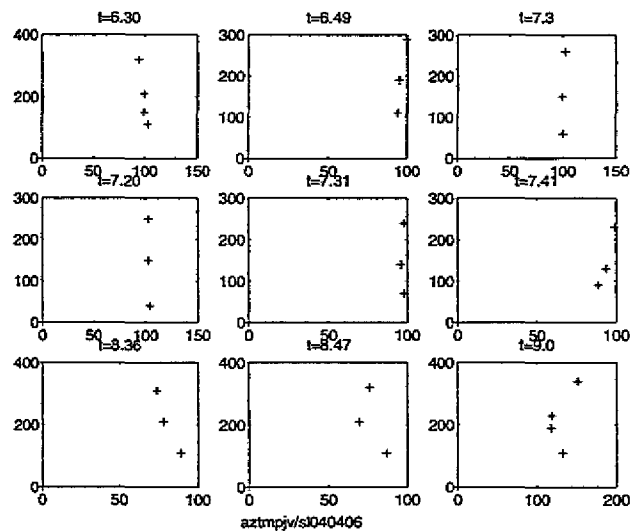


s501741

Figuur 16.1 Concentratie verloop (in mg/l) op 12 april 1989 in meetpunt 6 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).

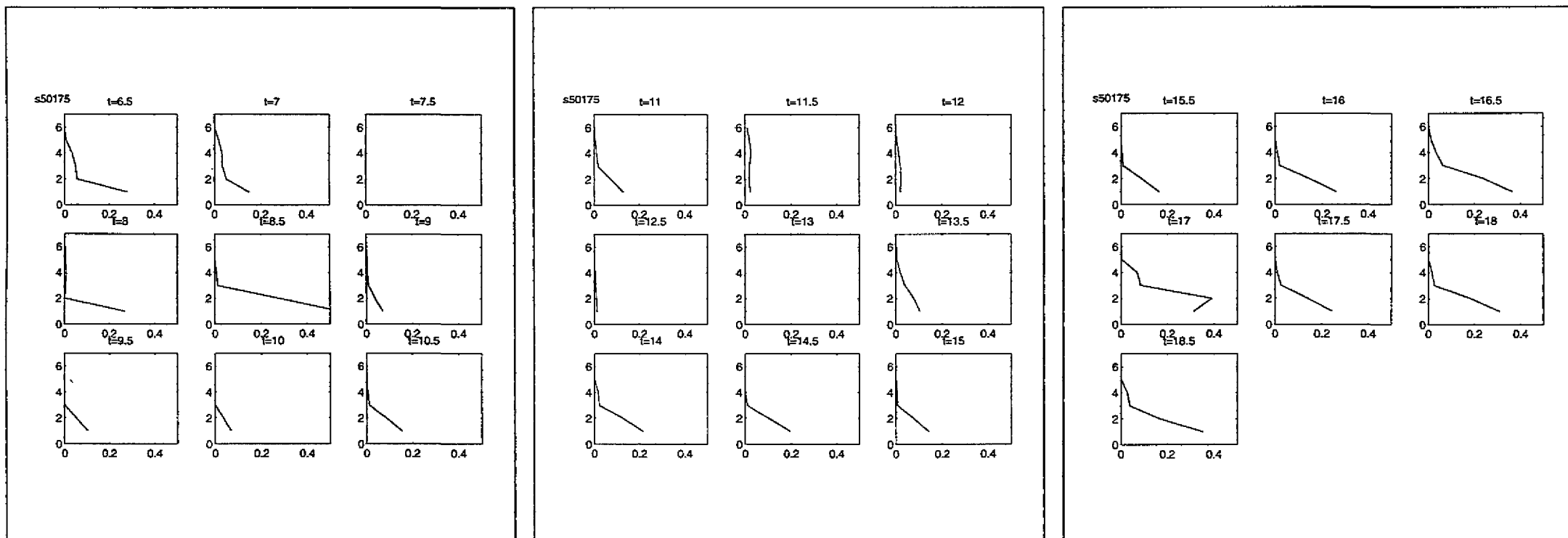


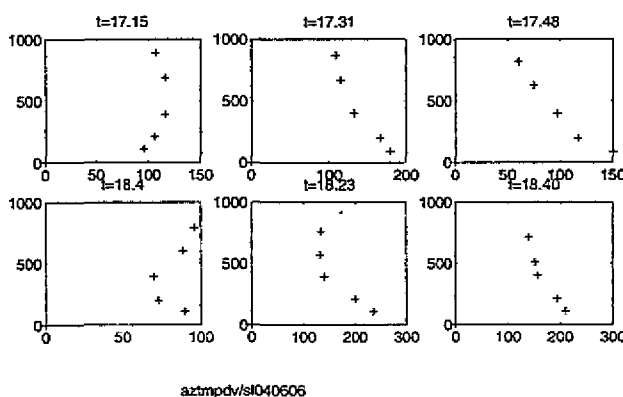
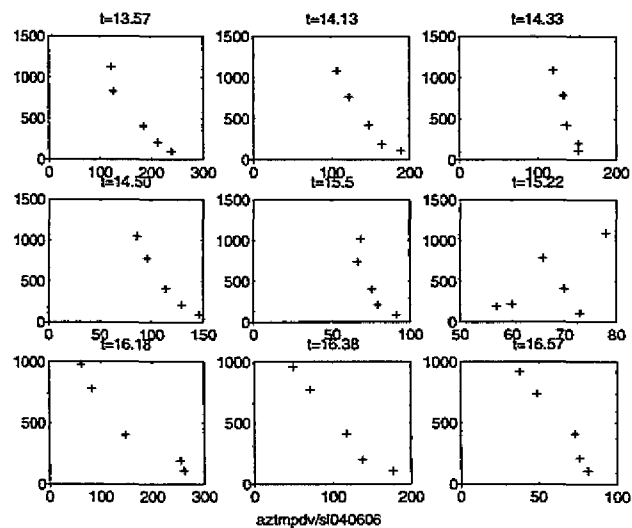
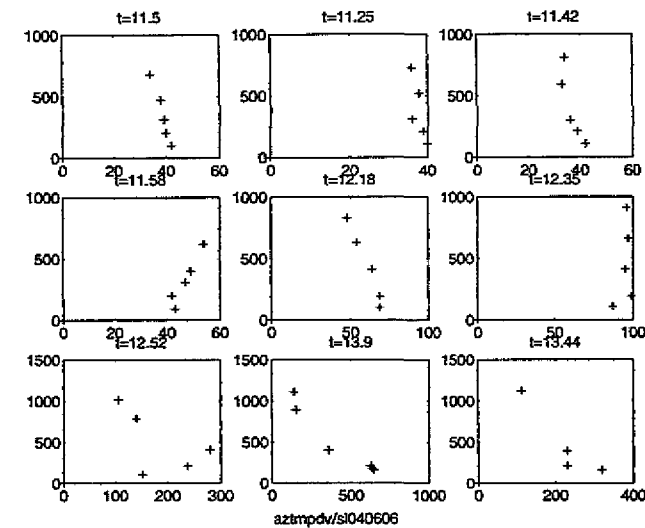
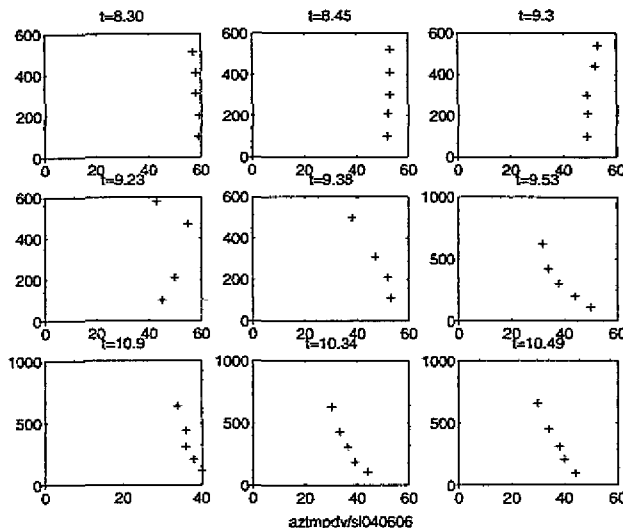
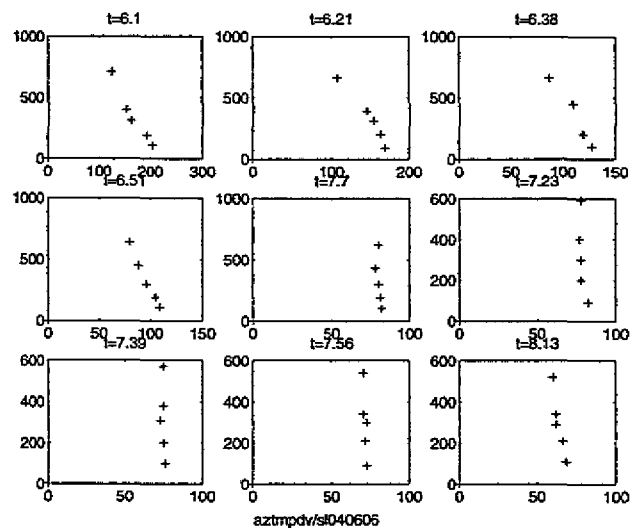
Figuur 16.2 Concentratie verloop (in mg/l) op 12 april 1989 in meetpunt 8 (figuur 4): model (onderste figuur) versus meting (boven).



Figuur 17.1 Concentratie profielen (in mg/l) op 4 april 1989 in meetpunt 3: meting. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.

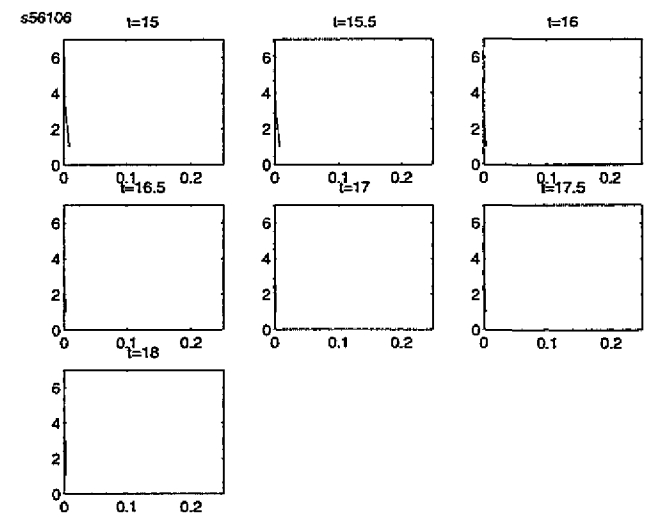
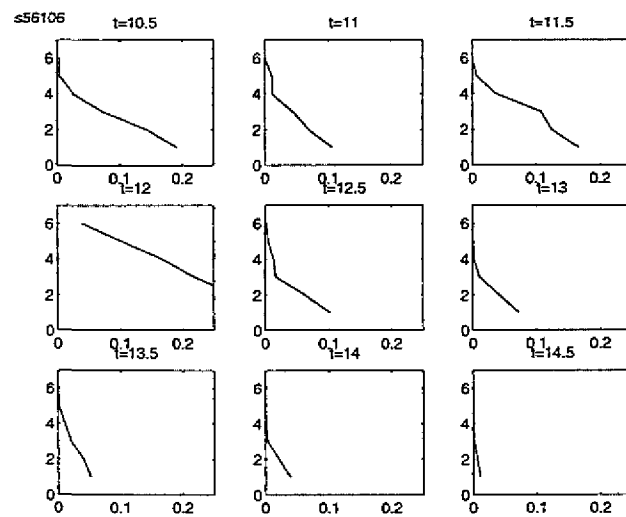
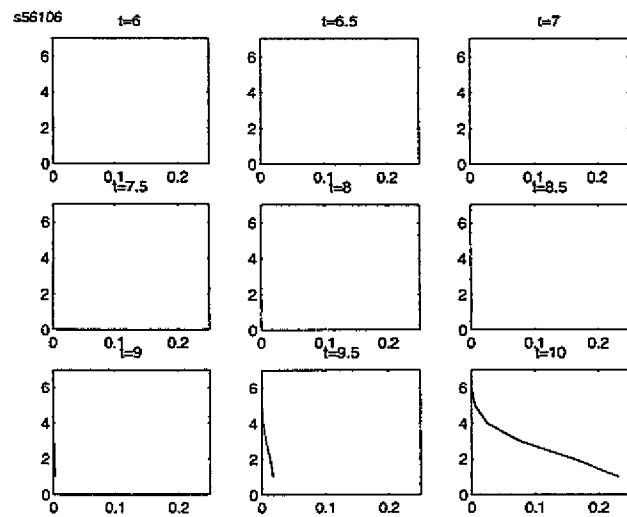
Figuur 17.2 Concentratie profielen (in g/l) op 4 april 1989 in meetpunt 3:
model. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.

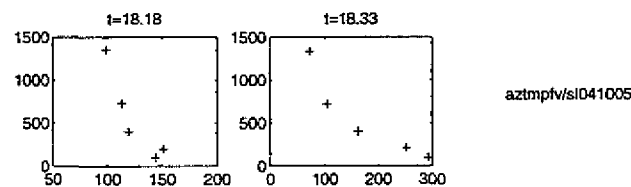
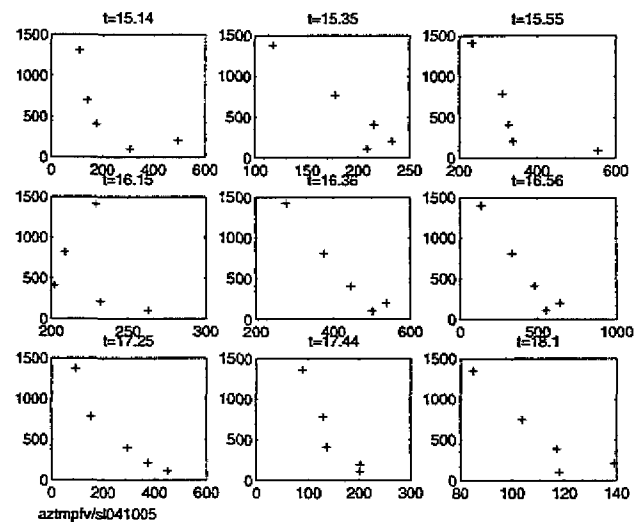
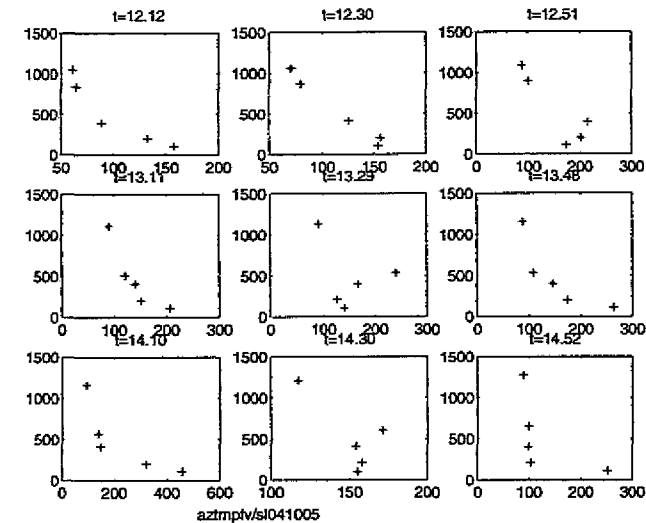
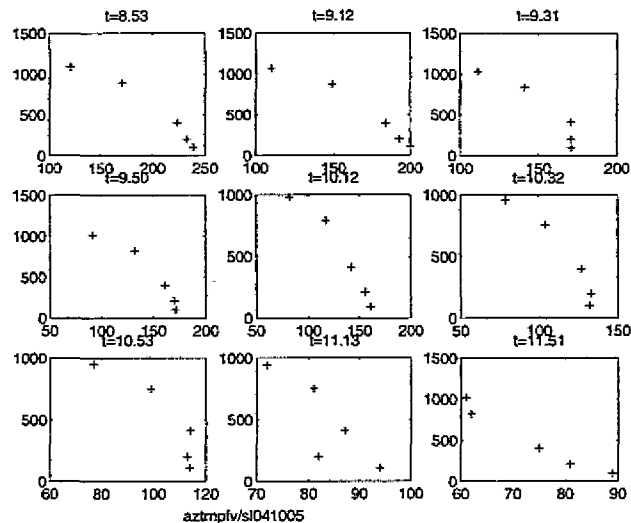
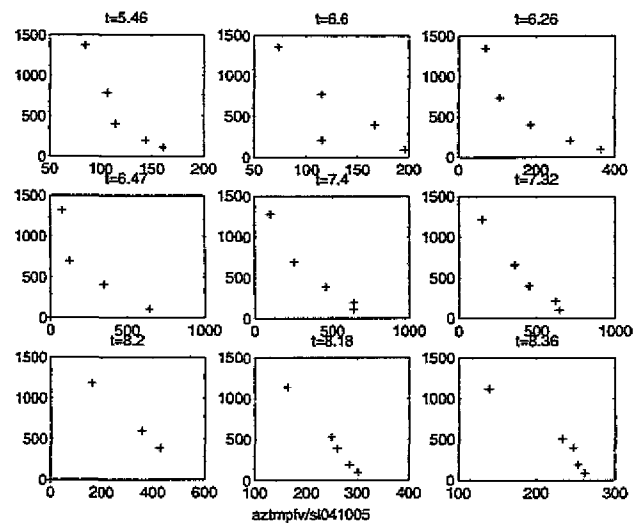




Figuur 17.3 Concentratie profielen (in mg/l) op 6 april 1989 in meetpunt 5: meting. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.

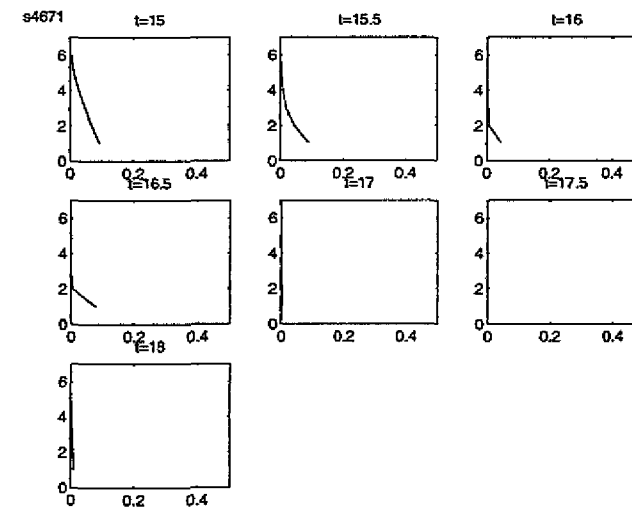
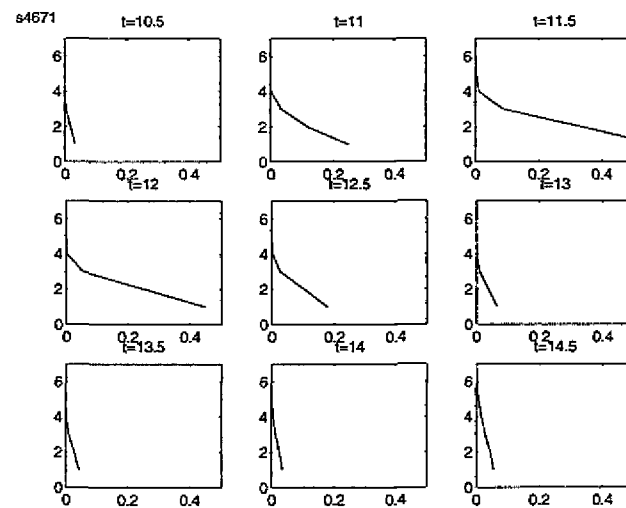
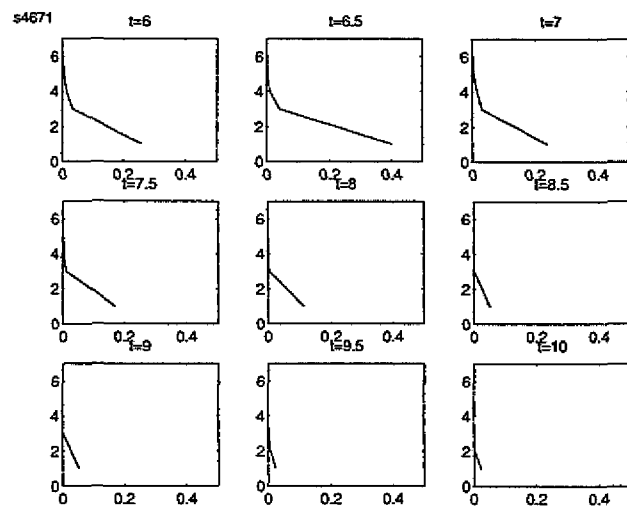
Figuur 17.4 Concentratie profielen (in g/l) op 6 april 1989 in meetpunt 5:
model. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.

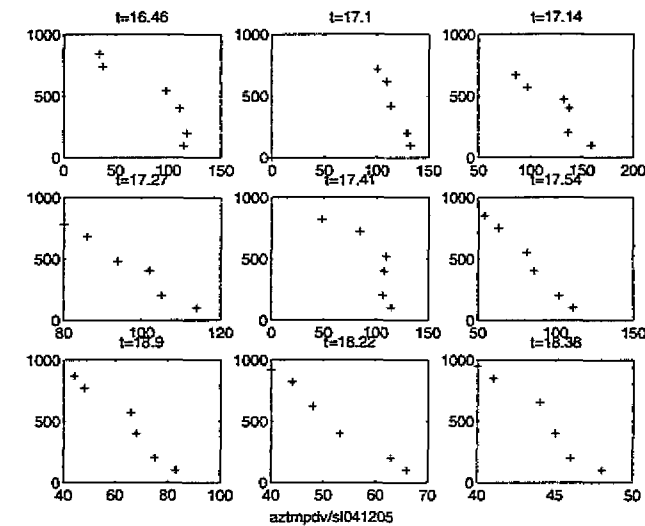
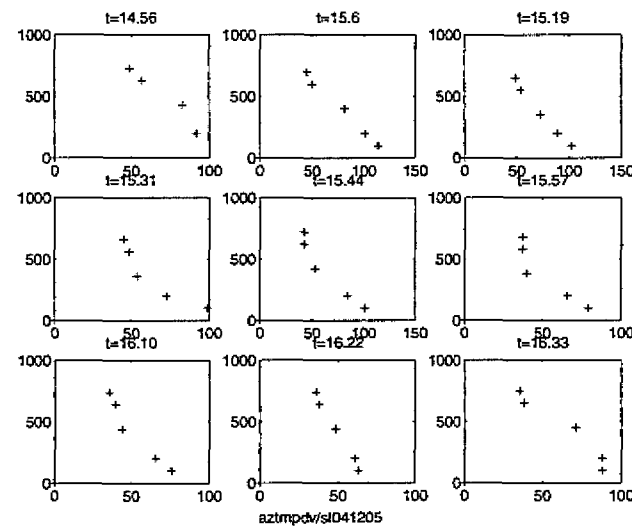
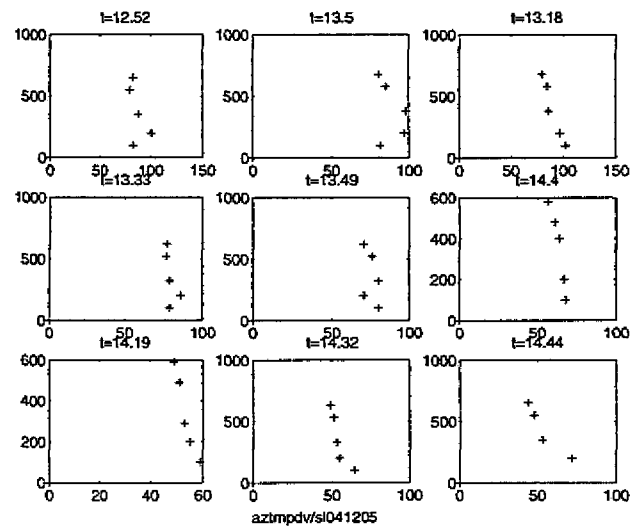
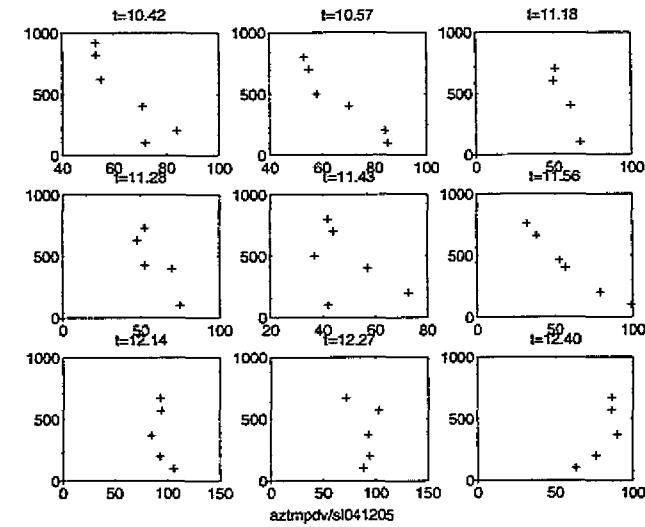
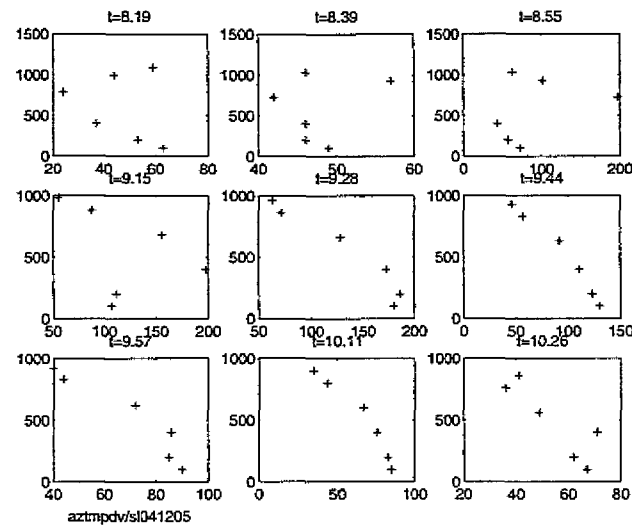
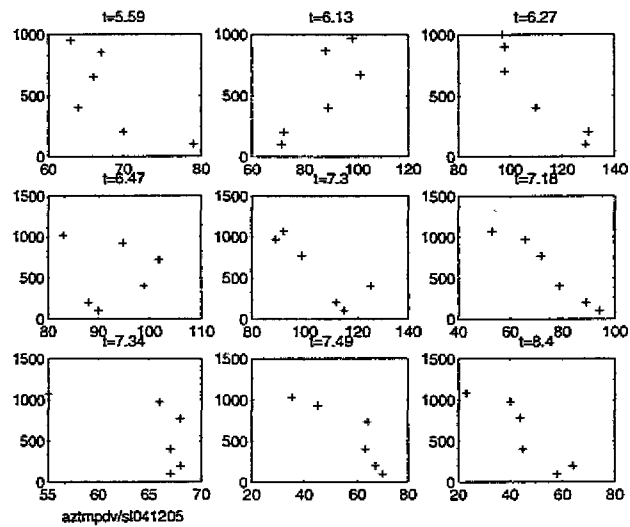




Figuur 17.5 Concentratie profielen (in mg/l) op 10 april 1989 in meetpunt meting. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as

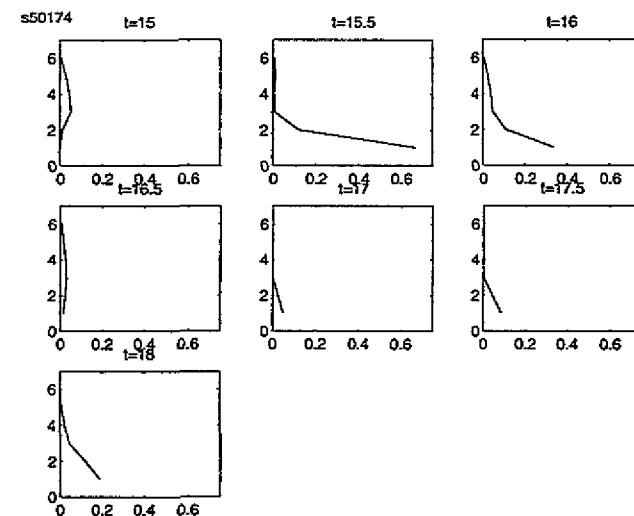
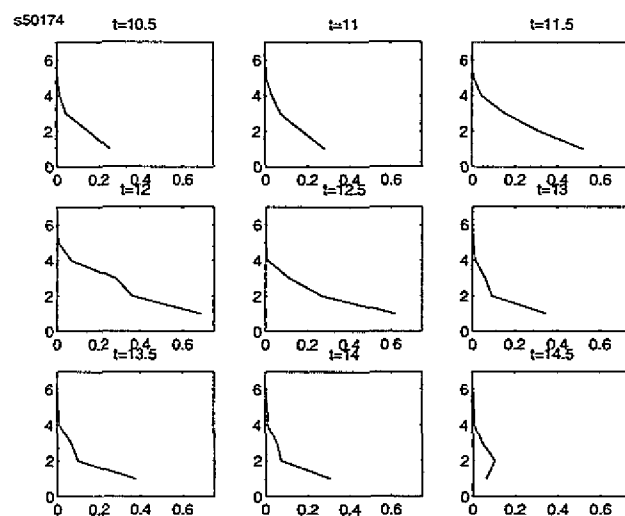
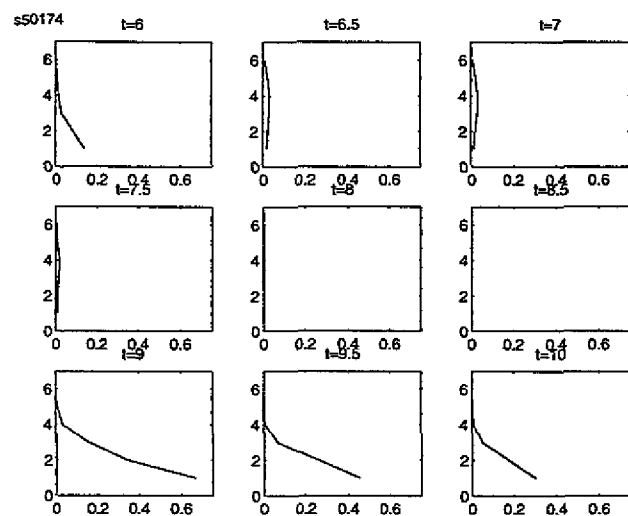
Figuur 17.6 Concentratie profielen (in g/l) op 10 april 1989 in meetpunt 2:
model. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.



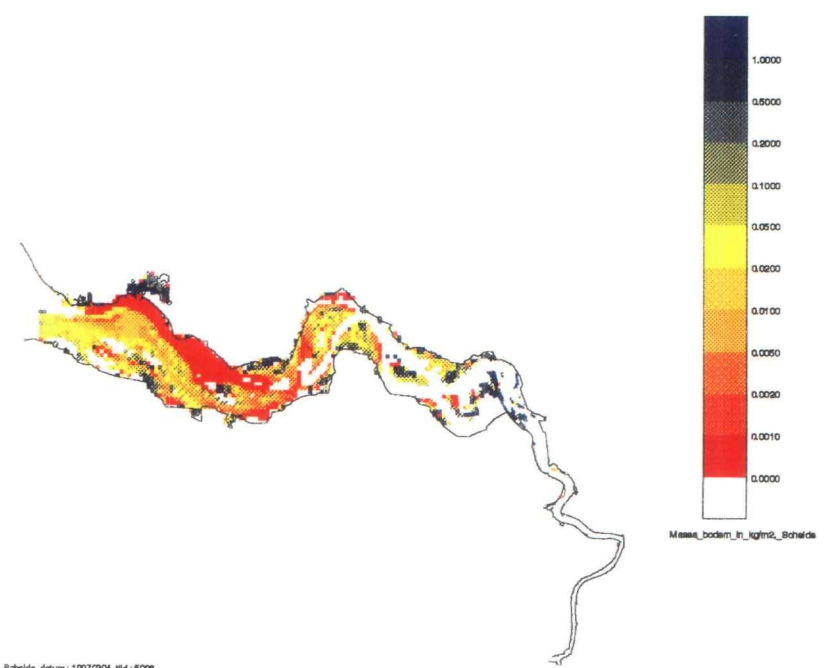
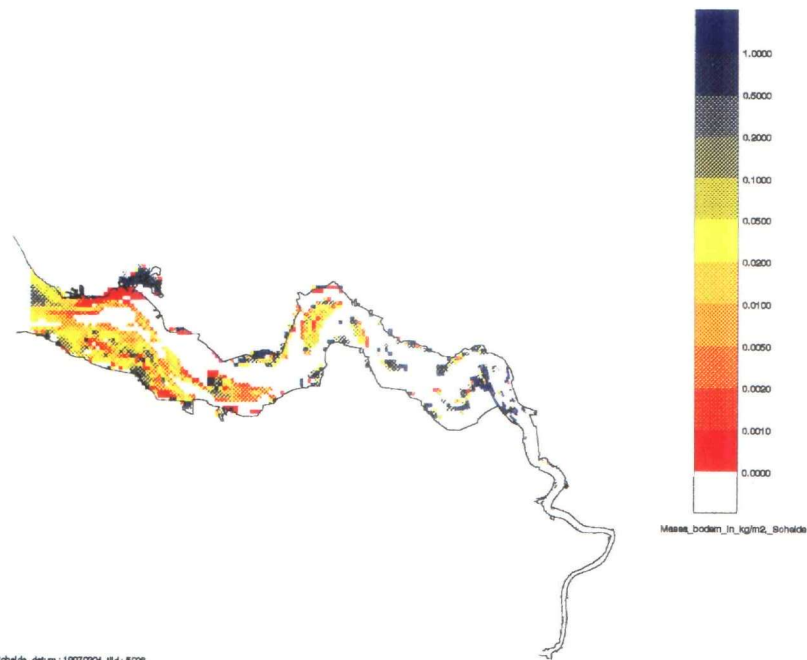
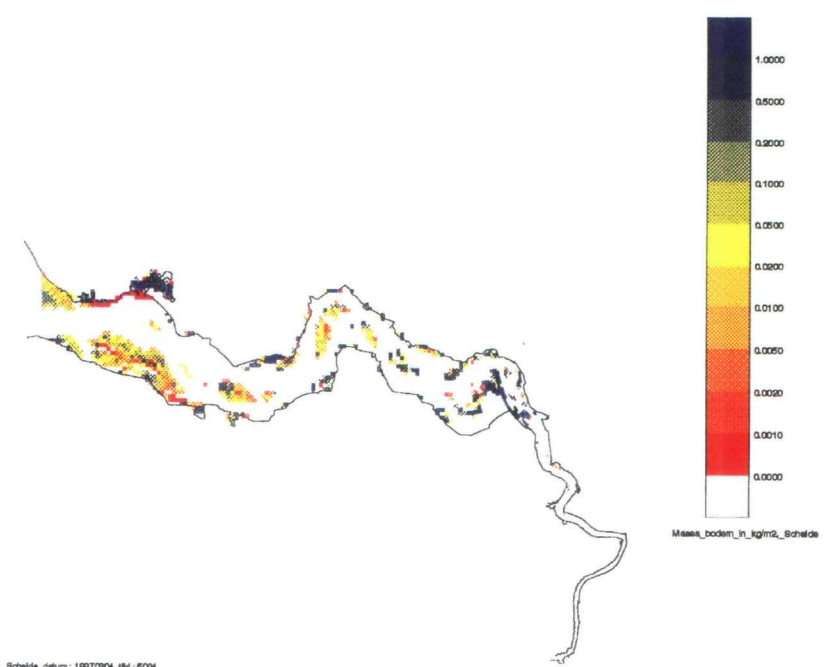
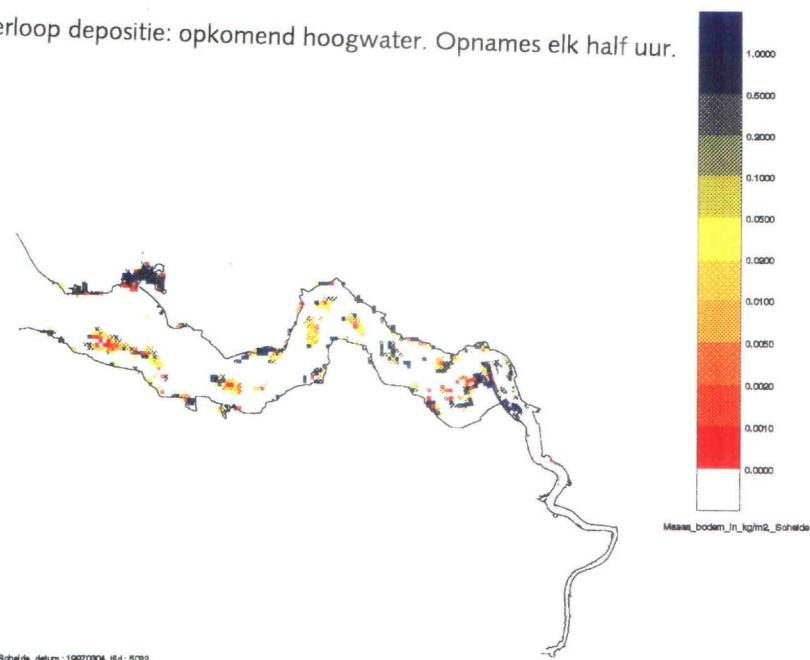


Figuur 17.7 Concentratie profielen (in mg/l) op 12 april 1989 in meetpunt 1041205. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.

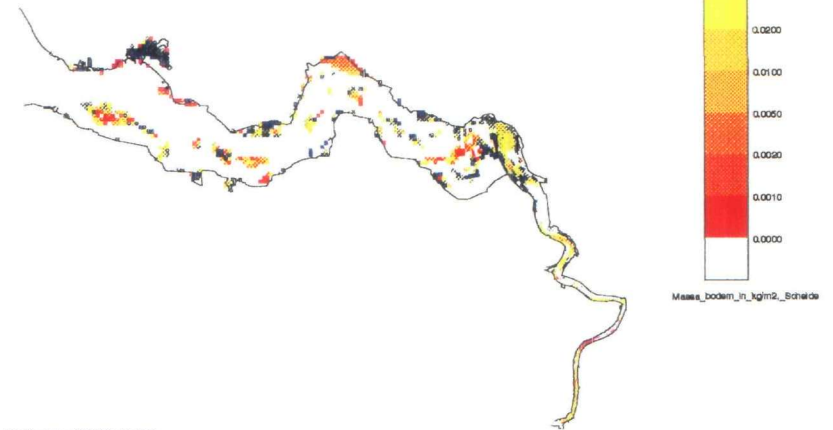
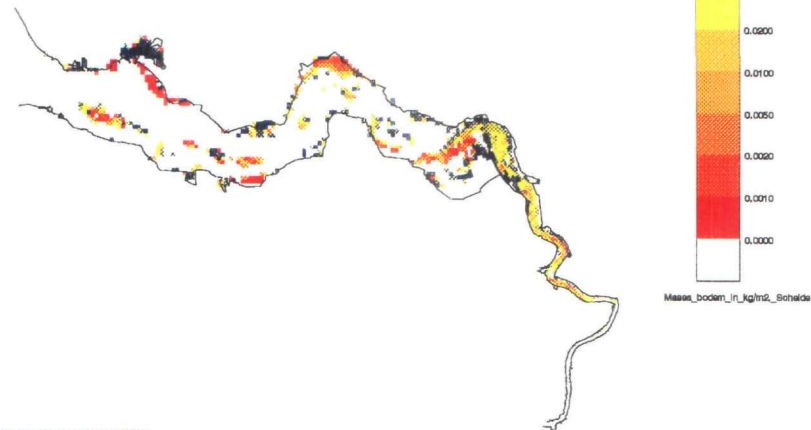
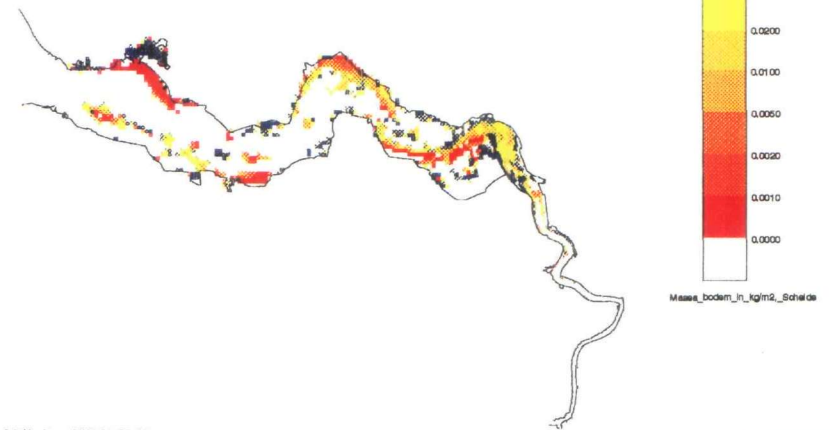
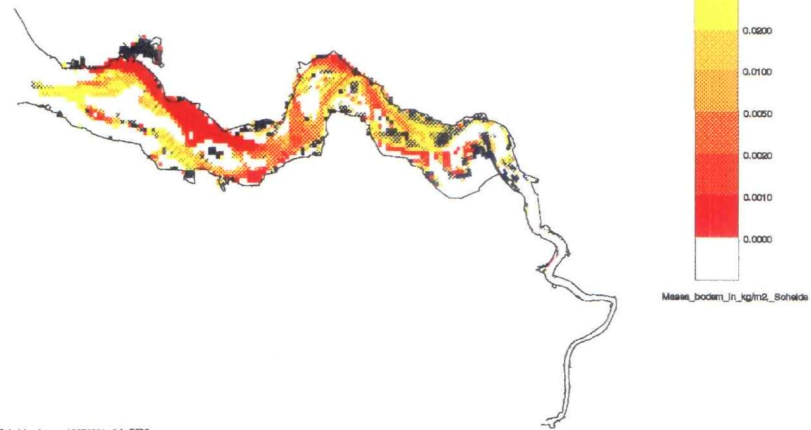
Figuur 17.8 Concentratie profielen (in g/l) op 12 april 1989 in meetpunt 6:
model. Concentratie op horizontale as, diepte op verticale as.

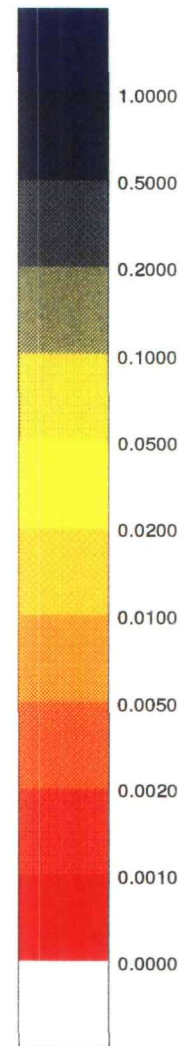
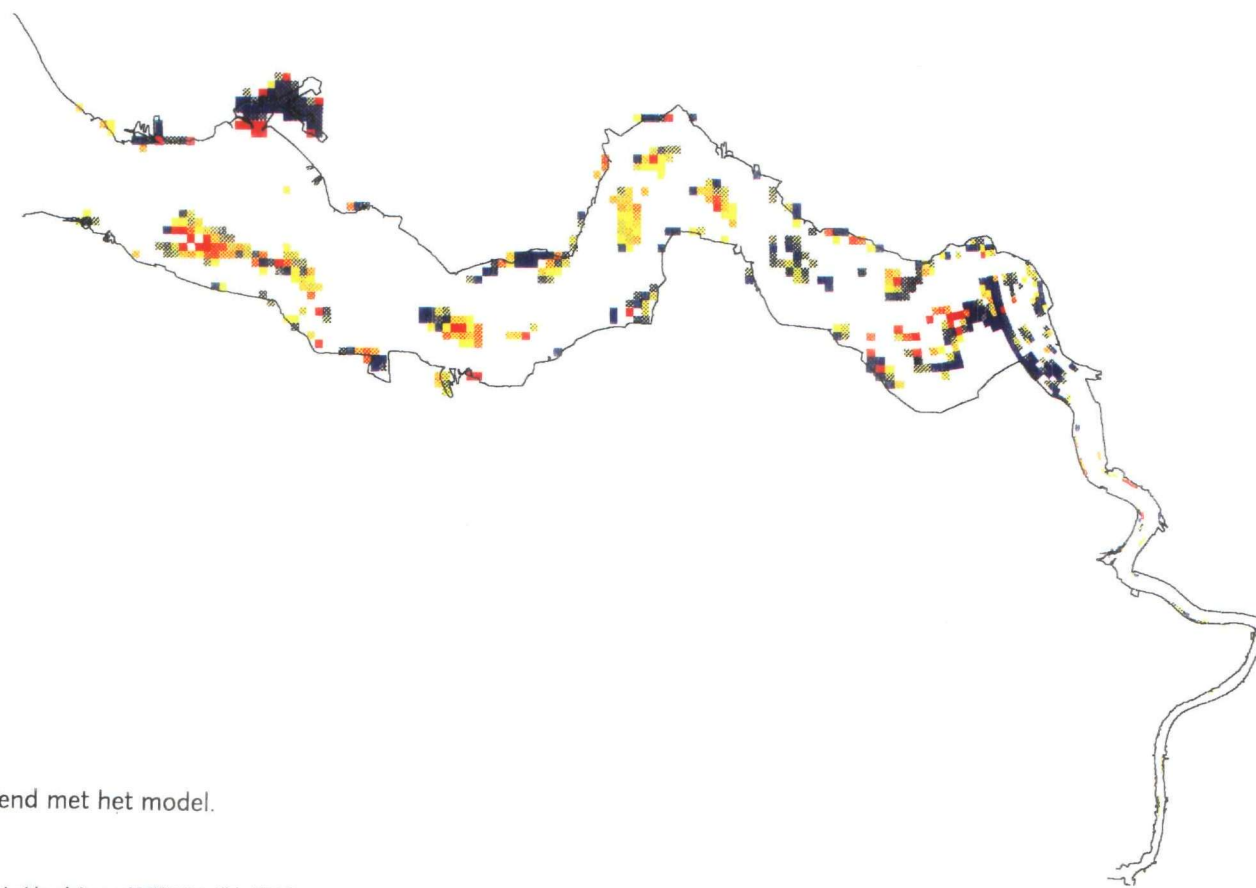


Figuur 18.1 Verloop depositie: opkomend hoogwater. Opnames elk half uur.



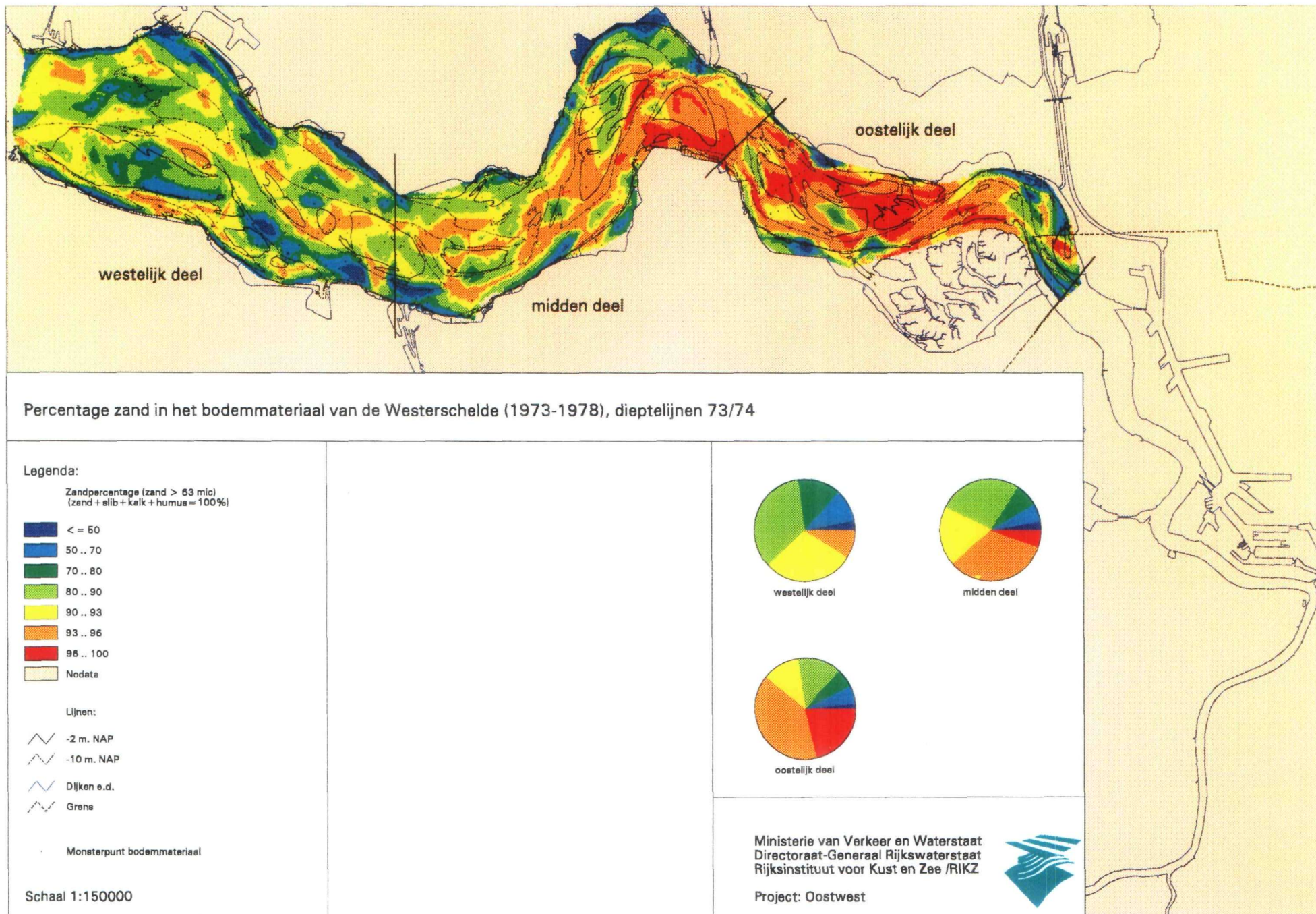
Figuur 18.2 Vervolg verloop van depositie: afnemend hoogwater.



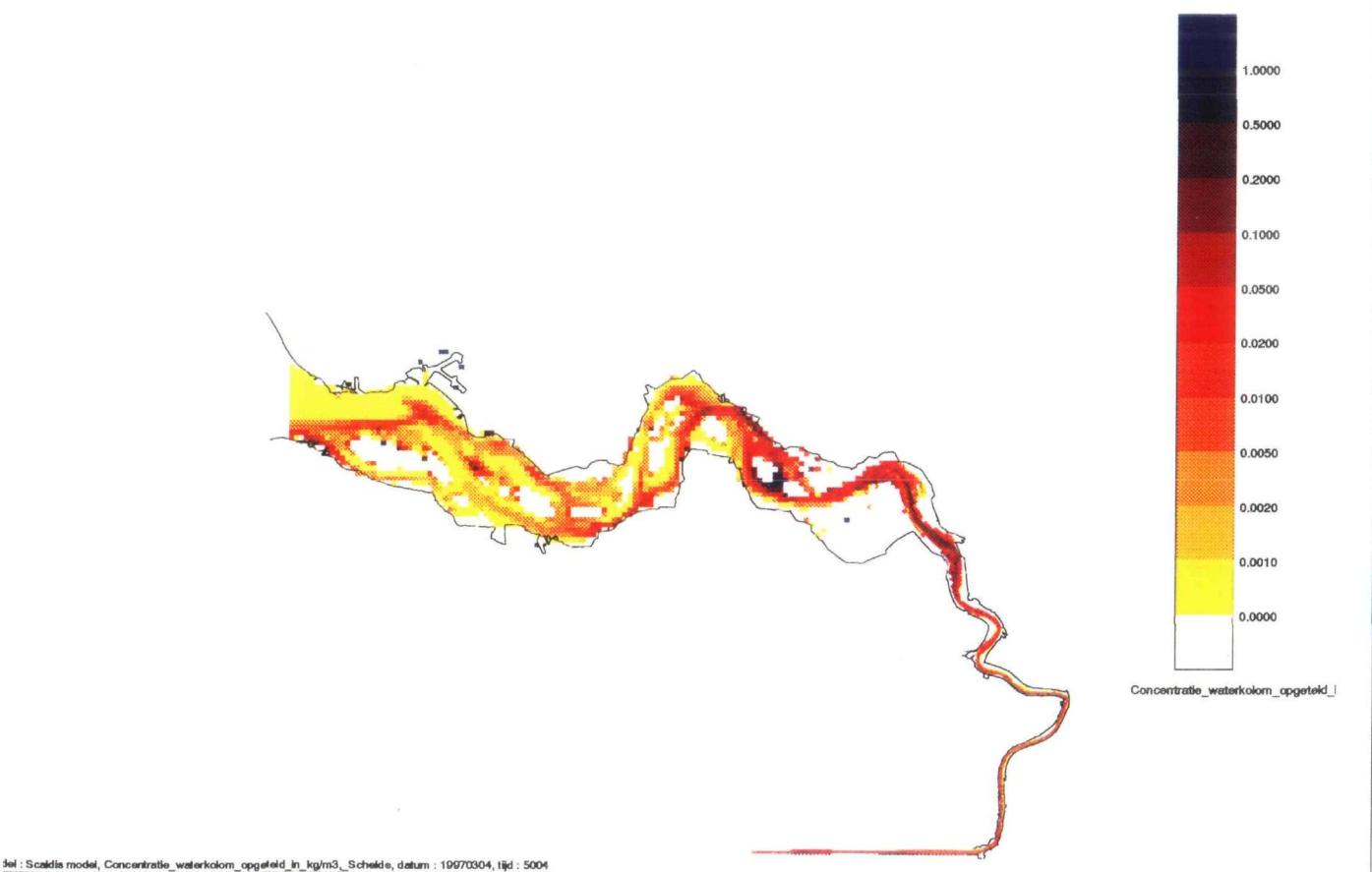
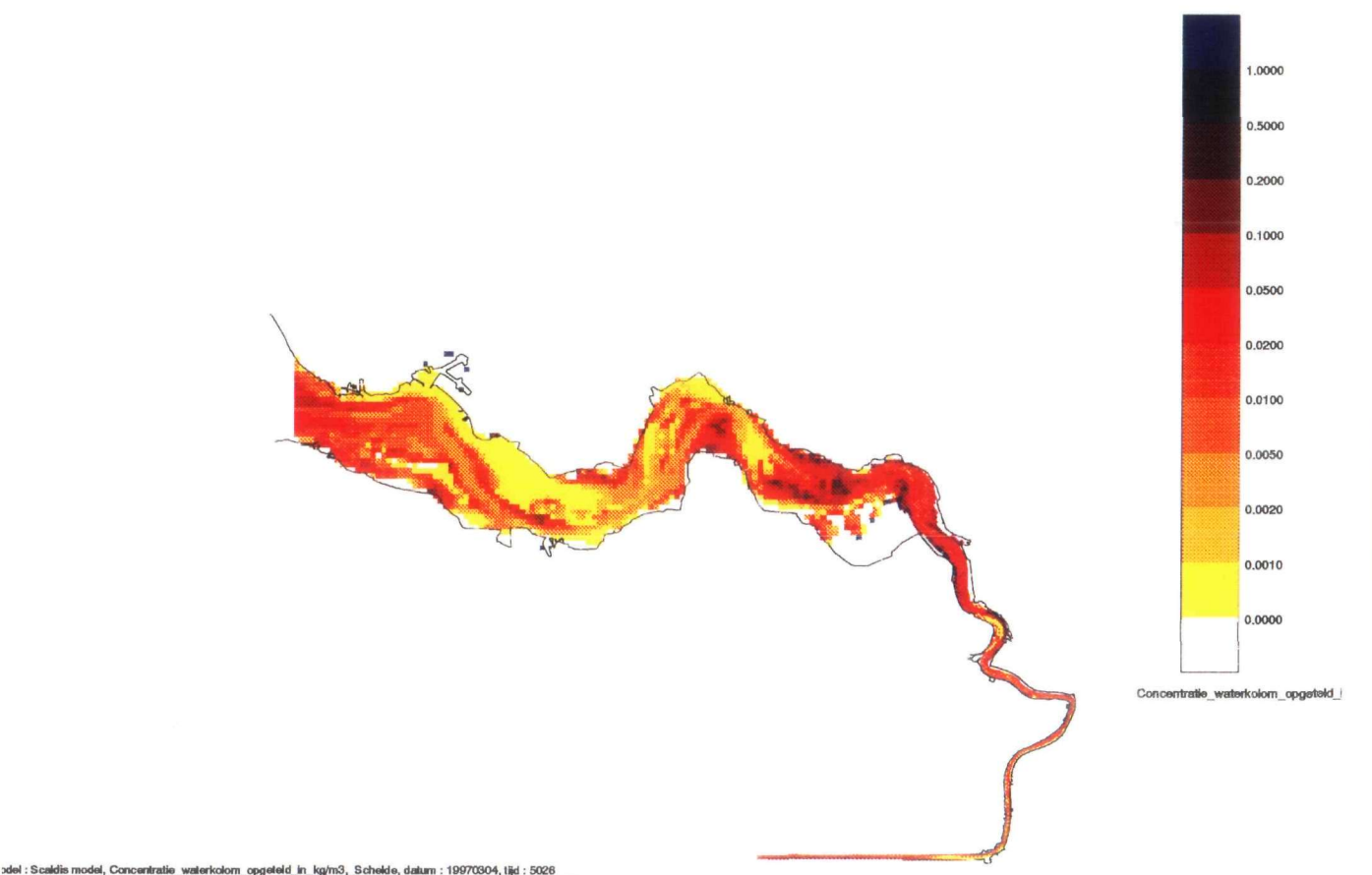


Massa_bodem_in_kg/m2,_Schelde

Figuur 19 Slibsedimentatie berekend met het model.



Figuur 20 Slibpercentage in de bodem van de Westerschelde.



figuur 22 Slibconcentratie (in g/l) bij hoogwater (boven) en laagwater (onder)